LES INDISPENSABLES DE SCIENCES ET AVENIR - NUMÉRO SPÉCIAL 210 JUILLET/SEPTEMBRE 2022 - 50 PHÉNOMÈNES INTRIGANTS

NUMÉRO SPÉCIAL 210 JUILLET/SEPTEMBRE 2022 - ALLEMAGNE 8.00 € / BELGIQUE : 6.10€ / GRÈCE : 6.20€ / ESPAGNE : 6.20 € / ITALIE : 6.20 € / DOM: 6.20€ / LUXEMBOURG : 6.10 € / PORTUGAL CONT : 6.20 € / TOM S : 860 XPF / TOM AVION : 1600 XPF / SUISSE : 9.80 CHF / TUNISIE : 10 TND / MAROC : 60 MAD / CANADA : 9.49 $CAD

SERGE BLOCH ; JOHN FINNEY/GETTY IMAGES ; SPL/SUCRÉ SALÉ ; ABACA PRESS ; CREATIVE COMMONS

LES INDISPENSABLES

SCIENCES ET AVENIR

+ 9 EXPÉRIENCES INSOLITES à faire en famille

L 13667 - 210 H - F: 5,90 € - RD

50 PHÉNOMÈNES INTRIGANTS

Quand le cerveau nous joue des tours

Le mystère des cercles de pierres

Dans le ciel, des formes étranges

Cholestérol : attention aux excès !

Le cholestérol est indispensable à l'organisme. Constituant fondamental des membranes cellulaires, il permet aussi de fabriquer la testostérone, les oestrogènes ainsi que la vitamine D. Cependant, un excès de cholestérol peut entraîner la formation de dépôts, appelés plaques, sur les parois des artères.

Cholestérol et stress oxydatif : un facteur aggravant

Les résultats des dernières études scientifiques montrent que le stress oxydatif est un facteur aggravant pour la formation de ces plaques. Il déclenche une réaction immunitaire faisant intervenir des globules blancs qui viennent s'ajouter aux dépôts de cholestérol, augmentant l'épaisseur de la plaque.

Qu'est-ce que le stress oxydatif ?

Le fonctionnement normal de l'organisme génère des radicaux libres, des particules très énergétiques essentielles au bon fonctionnement de l'organisme, mais qui peuvent endommager les cellules lorsqu'elles sont en excès, si elles ne sont pas neutralisées par des antioxydants. On parle alors de stress oxydatif.

Préserver naturellement la santé cardiovasculaire

L'apport d'actifs naturels, par l'alimentation et/ou par une supplémentation, peut aider à réguler les taux de cholestérol et à diminuer le risque de formation de plaques.

Connaissez-vous l'ail noir ?

L'ail noir est obtenu par un processus de maturation permettant de concentrer les principes bioactifs de l'ail. Il est ainsi 10 fois plus riche en antioxydants que l'ail frais.

Innovation pour lutter contre le cholestérol

ControlStérol aide à réguler naturellement les taux de cholestérol grâce à une combinaison unique d'extraits concentrés d'Ail noir riche en antioxydants et de Cannelle de Ceylan, associés à une souche brevetée de ferments lactiques, des vitamines et des nutriments essentiels. Une gélule « jour » et une gélule « nuit » aident à limiter le «mauvais» cholestérol LDL et son oxydation, limitant le risque cardiovasculaire associé, tout en augmentant le «bon» cholestérol HDL. **Une solution naturelle, simple, efficace !**

Des conseils ?

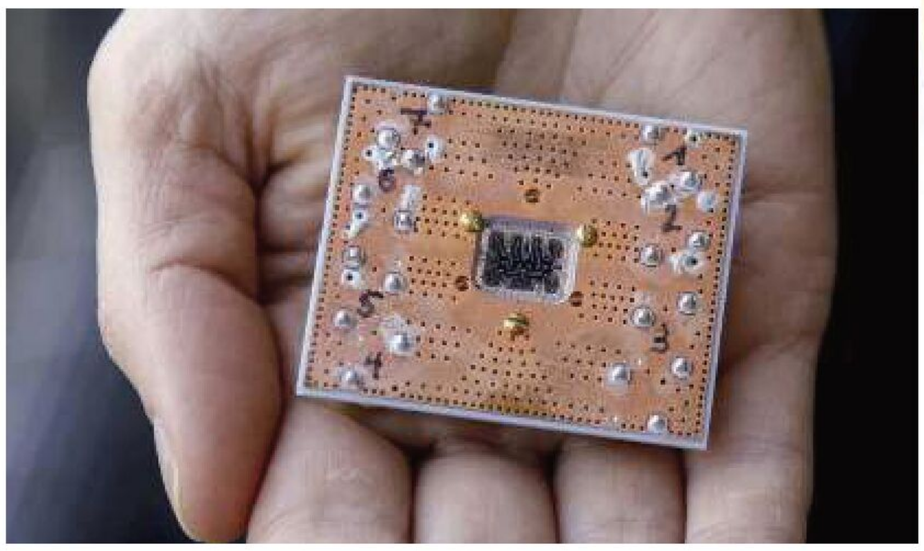
Les experts PhytoResearch vous répondent au **01 84 20 62 34** ou sur **www.controlsterol.com**

ControlStérol™
régulateur de cholestérol naturel

Disponible en pharmacie

ControlStérol boîte 60 gélules végétales (30 gél "jour" & 30 gél "nuit") ACL 626 04 90 - Convient aux végétaliens

Sommaire

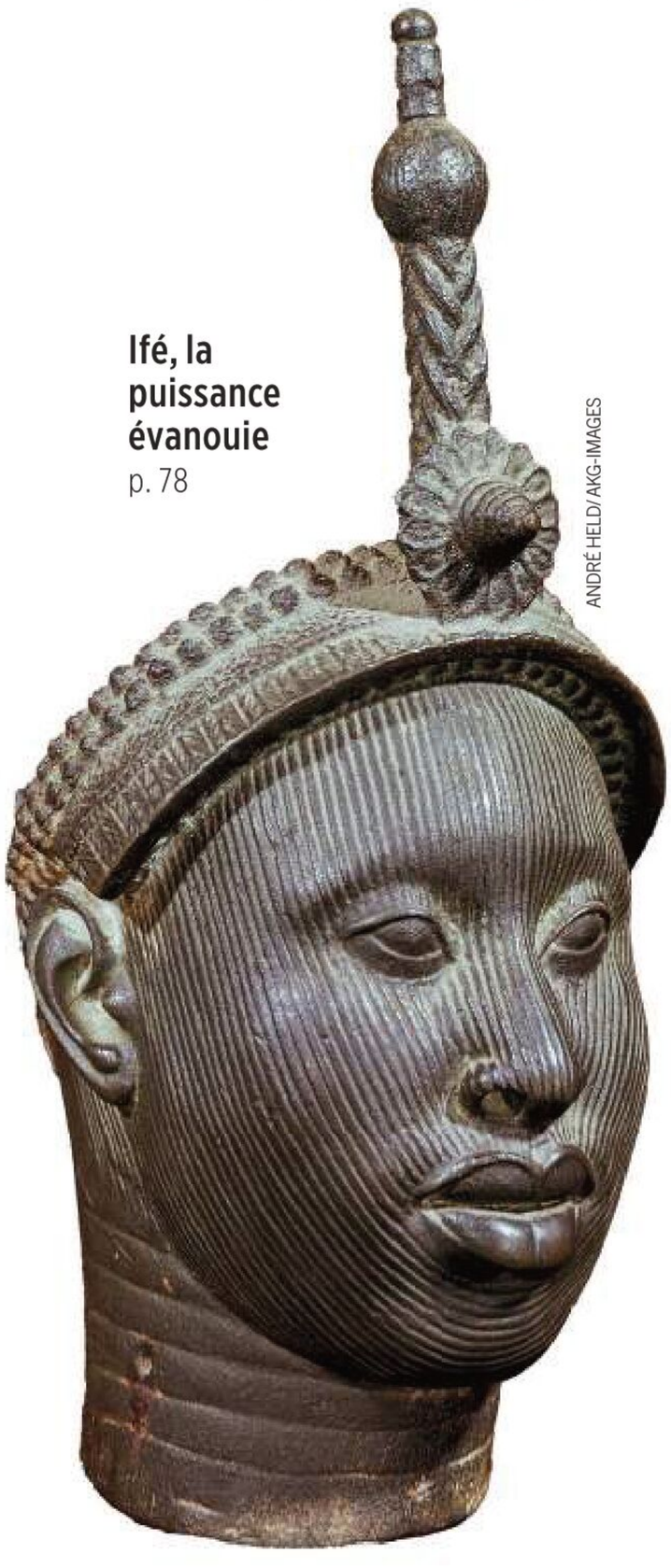


SETH WENIG/AP/SIPA

Le quantique, c'est fantastique ! p. 20

BYELIKOVA OKSANA/GETTY IMAGES

La Terre, planète excentrique ! p. 48



ANDRÉ HELD/AKG-IMAGES

Ifé, la puissance évanouie
p. 78

SPL/SUCRÉ SALÉ

Sexualité : toutes les pratiques sont dans la nature p. 36

STEPHEN C HUMMEL

Au-dessus des nuages, d'étranges éclairs… p. 18

5 **Édito**

6 RENCONTRE

Stéphane Van Damme
« Pour expliquer la nature, on s'intéresse à ses anomalies »

10 AU-DESSUS DE NOS TÊTES

10 Des nuages comme s'il en pleuvait

15 **INTERVIEW Vincent Costes**
« 99 cas de "soucoupe volante" restent inexpliqués malgré nos enquêtes »

17 Des sphères qui sentent le soufre

18 Au-dessus des nuages, d'étranges éclairs…

20 MATHS ET MATIÈRE

20 Le quantique, c'est fantastique !

25 Métamatériaux, les secrets de l'invisibilité

26 Curiosités mathématiques

28 **INTERVIEW Yasmine Amhis**
« Une particule de matière, sur un milliard, a réussi à survivre. Pourquoi ? »

29 9 EXPÉRIENCES INTRIGANTES À FAIRE CHEZ SOI

36 LES BIZARRERIES DU VIVANT

36 Toutes les pratiques sont dans la nature

41 **INTERVIEW Thomas Kroj**
« Entre la plante et ses agresseurs, une incessante course à l'armement ! »

42 Les champions de la synchronisation

44 La fin tragique des animaux zombies

48 PORTFOLIO
La Terre, planète excentrique !

54 NOUS, LES HUMAINS

54 Quand notre cerveau nous joue des tours

59 **INTERVIEW Sylvie Droit-Volet**
« Notre perception du temps varie avec nos émotions »

61 La chimie du désir

62 Troublantes rencontres dans la vallée de l'étrange

66 Pourquoi pleurons-nous ?

71 **INTERVIEW Yves Le Dréan**
« La situation pourrait être plus complexe que ce qu'en perçoivent les patients »

72 LES MYSTÈRES DU PASSÉ

72 Pourquoi ont-ils dressé Stonehenge ?

77 **INTERVIEW Sébastien Procureur**
« Pour les plus enthousiastes, le Big Void abriterait le corps du pharaon »

78 Ifé, la puissance évanouie

79 L'illisible manuscrit de Voynich

81 Ces immenses figures invisibles… sauf du ciel

82 SUR NOTRE SITE

72H POUR DÉCOUVRIR ET PRÉSERVER
LES TRÉSORS DE NOTRE PLANÈTE BLEUE

GRAND OCEAN

DU 7 AU 9 OCT. 2022

À LA CITÉ DE LA MER, CHERBOURG-EN-COTENTIN
À SAINT-VAAST-LA-HOUGUE

& EN DIGITAL

www.grandocean-event.com

Partenaires Officiels

CHERBOURG en Cotentin

leCotentin COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION

NAVAL GROUP

Partenaires Associés

LA MANCHE LE DÉPARTEMENT

RÉGION NORMANDIE

Partenaires

CMN

SFA Agitateur d'eau

Organisé par

Les Echos Le Parisien ÉVÉNEMENTS

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

LES INDISPENSABLES
SCIENCES ET AVENIR

NUMÉRO SPÉCIAL
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.00.
Fax : 01.55.35.56.04.
redaction@sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale
Dominique LEGLU 56.02
Directrice de la rédaction
Carole CHATELAIN 56.57
Rédaction en chef Vincent REA 56.35
avec Florence LEROY 56.36
Directrice artistique Thalia STANLEY 56.21
Photo-iconographie Andreina DE BEI
(rédactrice en chef adjointe) 56.31
Isabelle TIRANT 56.32
Documentation Astrid SAINT AUGUSTE 56.48
Collaborateurs
Philippe PAJOT, Hervé RATEL
Ont collaboré à ce numéro
Jacques-Olivier BARUCH, Serge BLOCH, Bruno BOURGEOIS, Laureen BOUYSSOU, Marie-Amélie CARPIO, Loïc CHAUVEAU, Yann CHAVANCE, Marine CYGLER, Sara DE LACERDA, Denis DELBECQ, François FOLLIET, Jean-François HAÏT, Tania LOUIS, Roger MANSUY, Dorothée NOLAN, William ROWE-PIRRA, Pierre VANDEGINSTE, Agnès VERNET
Pour joindre la rédaction
01 55 35 56 00 – redaction@sciencesetavenir.fr
Courrier des lecteurs
courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel de la REBERDIÈRE 56.06
Assistante de direction Valérie PELLETIER 56.01
Comptabilité compta@challenges.fr
Directeur général Philippe MENAT

Abonnements et anciens numéros : 01.55.56.71.48
4, rue de Mouchy – 60438 Noailles Cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

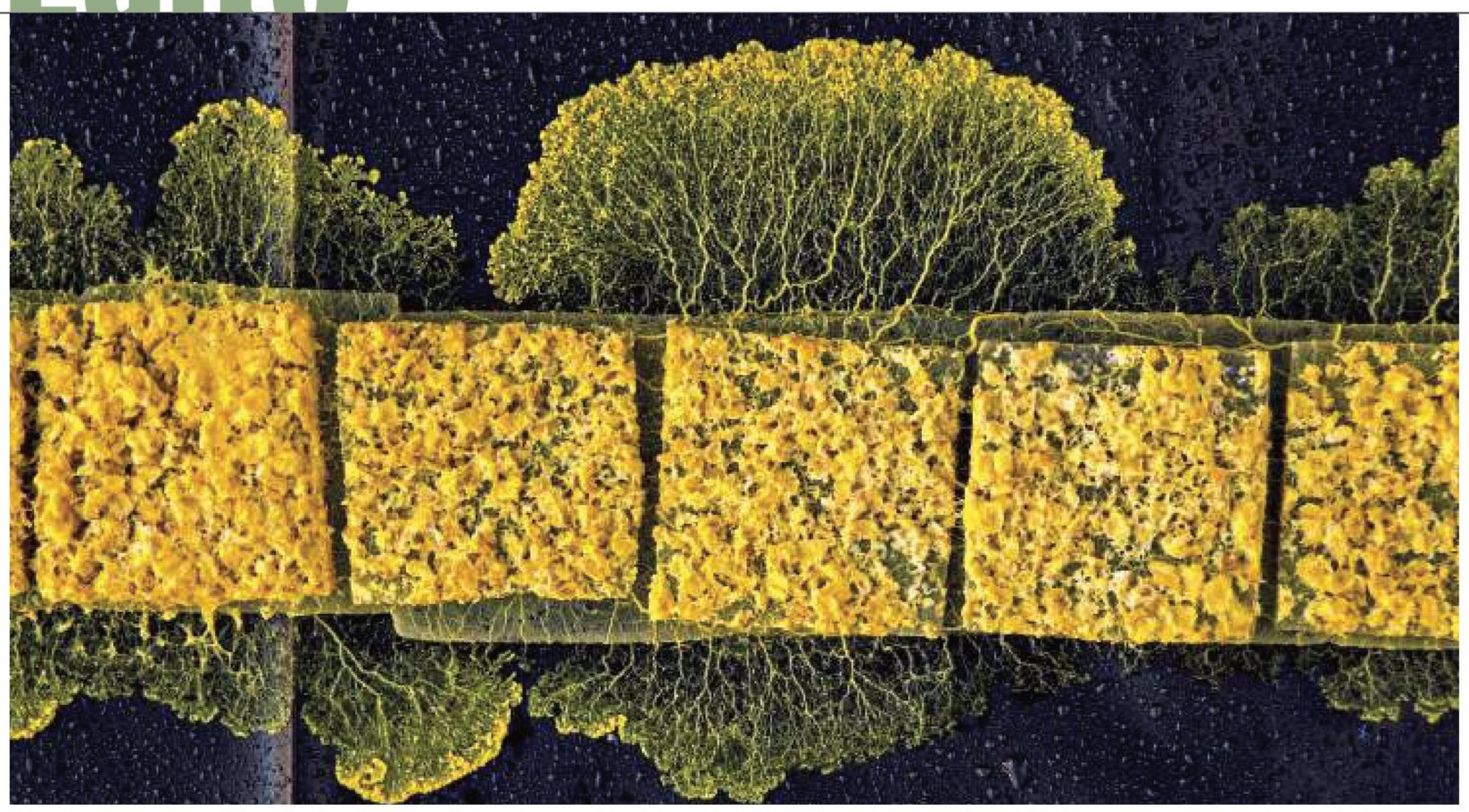
Publicité Médiaobs
44 rue Notre-Dame-des Victoires 75002 Paris
Tél. : 01.44.88.97.70 / Fax : 01.44.88.97.79
Pour joindre votre correspondant par téléphone, composez le 01.44.88 suivi des 4 chiffres qui figurent à la suite de son nom ; pour adresser un email à votre correspondant, l'initiale de son prénom puis son nom suivi de @mediaobs.com.
Directrice générale Corinne ROUGÉ 93.70
assistée de Marie-Noëlle MAGGIES 93.70
Directeur délégué Philippe LEONARD 89. 18
Directeur de publicité
Sylvain MORTREUIL 97.75
Responsable Web Romain COUPRIE 89.25
Assistante commerciale Séverine LECLERC 39.75
Exécution Nicolas NIRO 89.26
Administration des ventes Caroline HAHN 97.58
Ventes
Directeur commercial
Jean-Claude ROSSIGNOL 01.44.88.35.40
Directeur des ventes Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
01.55.35.56.62 assisté de Lina QUACH 56.63
Gérance : Claude PERDRIEL
Directeur de la publication : Claude PERDRIEL
Les abonnements et réabonnements doivent être adressés à Sciences et Avenir, service abonnement 45 avenue du Général Leclerc 60643, Chantilly, Cedex. Tél. : 03.28.38.47.69. Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros) : 35 e. 1 an complet (12 numéros + 4 hors-série) : 48 e. Tarifs pour les pays étrangers sur demande.
Multimédia : Sciences et Avenir, 41 bis avenue Bosquet, 75007 Paris. Tél : 01.55.35.56.00.
Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec Sciences et Avenir, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.
Copyright Sciences et Avenir.
Commission paritaire n° 0620K79712.
Distribué par Presstalis.
Photogravure : Éric BACQUET
Fabrication : Christophe PERRUSSON

PEFC 10-31-1557
Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
pefc-france.org

Origine du papier : Allemagne
Taux de fibres recyclées : 0%
Eutrophisation : PTot = 0,016 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Rotofrance Impression, certifié PEFC

ACPM OJD

Édito



GUILLAUME SOUVANT / AFP

En faisant fusionner un millier de cultures de *Physarum polycephalum*, ou blob, des élèves ont assemblé le 3 juin dernier le plus long organisme unicelllulaire du monde.

Curiosité naturelle

Cinquante-trois mètres et 9 centimètres ! Le 3 juin dernier, à Châteauroux, des lycéens créaient le plus long blob du monde. Un record établi en fusionnant leurs cultures de *Physarum polycephalum* élevées, avec amour, en classe. Le blob n'est plus un inconnu. Voilà des années que cet organisme unicellulaire aux capacités hors du commun ne cesse de nous étonner. Or, il n'est pas une créature née de l'esprit facétieux d'un biologiste. Il existe bel et bien dans la nature, prospérant paisiblement sur les vieilles souches et sous les feuilles mortes.

Pas la peine, donc, d'aller bien loin pour être épaté. L'étrange surgit près de nous, pour peu que l'on y soit attentif. Tenez, levez-la tête. Ce nuage en forme de lion n'est autre qu'une paréidolie. Une quoi ? Une illusion qui témoigne des travers de notre cerveau, celui-ci cherchant mordicus à donner un sens à tout ce qu'il perçoit. Observez ces libellules entremêlées sur le fil à linge : avec son pénis, le mâle s'affaire probablement à retirer de sa partenaire toute trace de ses prédécesseurs avant de copuler à son tour. En feuilletant ce numéro, vous constaterez d'ailleurs qu'il s'en passe de belles chez nos amies les bêtes, surtout en matière de fornication ! Mais vous découvrirez aussi une mystérieuse lave bleue, des individus capables d'entendre les couleurs, ou des métamatériaux promettant l'invisibilité…

Toutes ces phénomènes méritent qu'on s'y arrête. D'ailleurs, peut-on faire autrement ? La curiosité est probablement le propre des humains, une curiosité sans limites ni motivation autre que la *libido sciendi*, cette soif inextinguible de connaissance. La science en est l'incarnation. L'historien Stéphane Van Damme nous rappelle que celle-ci s'est construite dès l'Antiquité en questionnant les anomalies d'un monde que l'on considérait alors parfait. Une manière d'en dresser un portrait en creux, en des temps où il eût été malvenu de poser trop de questions. L'adage nous le dit bien : vilain défaut, la curiosité aura longtemps été marquée du sceau du péché. Chassés du paradis pour avoir croqué le fruit de l'arbre de la connaissance, nous revenons de loin !

Aujourd'hui, alors que la recherche pousse plus que jamais le réel dans ses retranchements, le champ de notre curiosité semble à nouveau sans limites. Que d'énigmes demeurent !

Certes, nous sommes désormais capables de transmettre à distance, par téléportation quantique, des codes secrets inviolables… mais nous nous interrogeons encore sur les raisons qui ont poussé des peuples à dresser des cercles de pierres ou à dessiner, dans le désert péruvien, des animaux géants invisibles sauf du ciel. Sans doute le saura-t-on demain…

En attendant, voilà l'été ! Vacances rimant avec expériences, amusez-vous à réaliser en famille celles que nous vous proposons. Les grands chercheurs ont d'abord été de petits curieux. Et continuons, ensemble, à nous étonner. Cultivons la curiosité, ce bien précieux. Et gardons à l'esprit la phrase de Térence : *« Je suis homme, et rien de ce qui est humain ne m'est indifférent »*.

VINCENT REA

STÉPHANE VAN DAMME
Professeur d'histoire moderne à l'ENS, spécialiste de l'histoire des sciences et des savoirs

« Pour expliquer la nature, on s'intéresse à ses anomalies »

Si le bizarre nous intrigue, c'est que nous pensons que le monde est ordonné, rappelle l'historien. Qui raconte comment, en Occident, la curiosité a été peu à peu mise au pas et codifiée. Excluant le merveilleux…

Quelle définition pourriez-vous donner de ce qu'est un phénomène intrigant ?
Quand il s'agit de définir des dénominateurs communs à ce qui nous intrigue, il faut préciser que depuis Aristote, nous sommes attirés vers les accidents du fait même de notre conception de la nature : ordonnée, marquée par des régularités. Or, pour expliquer celles-ci, on s'intéresse aux anomalies, à ce qui ne fonctionne pas bien, aux irrégularités.

Décrypter ce qui a pu intriguer par le passé, c'est finalement faire une histoire de la curiosité scientifique… Quels étaient les premiers sujets d'étonnement ?
Dans les mondes anciens, on s'intéresse aussi bien à la zoologie qu'à la physique. Les savants sont polyvalents. Les mathématiques, par exemple, ne sont pas un domaine d'activité en soi : il n'y a pas de mathématicien pur ! Contrairement à la période contemporaine où l'on peut décrire un monde scientifique, parce qu'il s'est professionnalisé, la curiosité est alors totale et encyclopédique.
Par ailleurs, il y a chez les Égyptiens et chez les Grecs la tradition d'une science à mystères : la nature est voilée, elle recèle un secret qu'il faut révéler. La vision du monde est alors complètement encastrée dans une conception religieuse. On cherche à interpréter les prodiges divins. Prenez les conceptions mathématiques de Pythagore : elles sont liées à cette vision du monde qui en fait un langage symbolique, permettant d'expliquer un certain nombre de faits.

Comment cette curiosité totale s'est-elle muée en démarche scientifique ?
Déjà, au VII^e^ siècle avant notre ère, avec les présocratiques, germe l'idée qu'on dispose d'autres instruments que les conceptions religieuses pour rendre intelligible le monde physique : c'est cela qu'on va appeler science. Cette idée va se fortifier chez Aristote, qui a la volonté de mettre les choses en ordre : ses *Catégories* sont véritablement un manuel, une méthode, et vont remporter un énorme succès au Moyen Âge. Mais la curiosité va toujours porter vers l'identification des cas hors norme.

Auriez-vous quelques exemples ?
On pense bien sûr aux monstres, ce qu'on appelle la tératologie – ou science des anomalies anatomiques. En particulier, en médecine, à tout ce qui tourne autour de la reproduction. Mais on regarde aussi les plantes, on remarque telle ou telle forme inhabituelle… Les catalogues médiévaux d'histoire naturelle comportent des dragons, des licornes… La monstruosité, c'est l'envers du décor. À la Renaissance encore, il y a des théories qui peuvent nous paraître complètement farfelues. Je

> « Les catalogues médiévaux d'histoire naturelle comportent des dragons, des licornes… Et à la Renaissance, Paracelse entend décrire les elfes et les sylphides

pense en particulier à Paracelse : voilà quelqu'un qui pousse à l'extrême le souci de classification ! Il considère par exemple qu'il faut décrire des êtres humains qui n'auraient pas été le fruit d'Adam et Ève, ce qu'il appelle les êtres humains non adamiques : les elfes, les sylphides…

La religion ne considérait-elle pas la curiosité comme un vilain défaut ?

Il y a eu pendant longtemps un double régime. D'un côté, depuis l'Antiquité, la curiosité fait partie des dispositions intellectuelles qui permettent de faire de la science, ce qu'on appelle la *libido sciendi*, le désir de connaître. Mais avec les premiers chrétiens, saint Augustin surtout, la curiosité devient un péché… et elle le restera jusqu'au XIXe siècle : c'est révéler des choses qui ne vous regardent pas, qu'elles soient merveilleuses ou monstrueuses. Cet interdit est lié aussi au péché originel. Parce que l'homme a voulu manger du fruit de l'arbre de la connaissance, il a chuté. De ce fait, les religions monothéistes vont avoir tendance à verrouiller le rapport à l'enquête naturaliste : il faut que ça rentre dans le cadre ! La théologie étant la reine des sciences, tout est réorienté vers l'explication de phénomènes divins. On est dans un monde enchanté, merveilleux.

À la Renaissance, on redécouvre les traditions platoniciennes et une vision symbolique du monde, mais aussi l'hermétisme égyptien, qui aura un grand succès auprès des alchimistes. Ces derniers ont de la curiosité une conception beaucoup plus large, jusqu'à questionner l'orthodoxie de l'Église catholique. Avec à la clé pas mal de procès...

Chez les protestants, le savant et juriste Francis Bacon (1561-1626) va essayer de libérer les scientifiques de ce joug religieux : à côté d'une curiosité illicite, une curiosité honnête est tout à fait possible. Il en fait même le moteur de l'expérience scien- ◆◆◆

Stéphane Van Damme

Historien des sciences et des savoirs, il est, depuis septembre 2020, professeur d'histoire moderne à l'École normale supérieure (ENS). Il y dirige, au sein du Département d'histoire, le master d'histoire transnationale et globale. Il est également scénariste de bande dessinée.

Parmi ses ouvrages :

Histoire dessinée de la France, avec des dessins d'Héloïse Chochois, La Revue dessinée/La Découverte, 2021

Seconde nature. Rematérialiser les sciences entre Bacon et Tocqueville, Les Presses du réel, 2020

De la Renaissance aux lumières (dir.), tome 2 de *L'Histoire des sciences et des savoirs* sous la direction de Dominique Pestre, Seuil, 2015.

◆◆◆ tifique… à la condition de la codifier. La curiosité va donc progressivement être investie d'un certain nombre de normes, d'abord dans le souci de rendre compte scientifiquement de choses qu'aujourd'hui on qualifierait d'irrationnelles. Y compris par des savants comme Descartes ou Newton. Pour celui-ci, Dieu est caché derrière la nature : si l'on fait des mathématiques, si l'on essaie de construire des sortes d'harmoniques, c'est parce qu'il y a dans la nature des rapports harmoniques.

Pourquoi cette volonté de normer la curiosité ?

C'est une passion, qui peut donc être incontrôlée, voire pathologique. Dès le XVIe siècle se constituent des cabinets de curiosités, ou cabinets des merveilles, qui rassemblent des objets rares : ces noms évoquent bien une curiosité anarchique. Les textes médicaux, d'ailleurs, évoqueront jusqu'au XIXe siècle la folie du collectionneur… Mais revenons à Descartes : pour lui, le désir de connaissance doit être encadré. Certaines passions intellectuelles sont bonnes, telle l'attention, d'autres à proscrire comme l'étonnement, qui est un excès de merveilleux, ou l'admiration, qui peut porter à des erreurs de jugement. C'est l'époque où l'on va se poser la question : ne faudrait-il pas discipliner cette curiosité ? Une réflexion qui aboutira à la création des académies.

> « Au XVIIe siècle, l'astrologie et la géomancie sont interdites ; les savoirs populaires, vernaculaires, sont disqualifiés au profit d'une science académique

Mais ne perd-on pas quelque chose avec cette normalisation ?

Il y a eu un consensus, y compris de savants comme Bacon ou Descartes, pour éliminer un certain nombre de savoirs vernaculaires, de « sciences curieuses », en particulier les sciences de la divination, l'alchimie, l'astrologie, la magie. L'astrologie, considérée comme un savoir légitime au Moyen Âge, est complètement disqualifiée. En 1682, on interdit en France les astrologues, mais aussi la géomancie, et toute forme de magie. Les alchimistes seront embastillés. Auparavant, il existait un continuum entre savoirs savants et populaires, avec une différence qui n'était pas de nature mais de degré : la science, c'est une meilleure connaissance des phénomènes naturels, mais meilleure par rapport à quelque chose qui peut être quand même vrai. Ces savoirs populaires vont être disqualifiés.

Toutes ces « sciences curieuses » vont donc être éliminées ?

Jusqu'au XVIIIe siècle, on est encore dans une période de transition. Il faut par exemple traiter des fantômes, des apparitions. Vous avez des épidémies de vampires dans les Balkans ou les îles grecques qui sont prises très au sérieux : à la cour des Habsbourg, l'empereur dépêche dans ces zones une commission d'enquête ! Et les Lumières sont aussi marquées par certaines croyances, par exemple sur le magnétisme animal.

Mais progressivement, ces déviances sont pathologisées. Et en même temps que l'on discipline la curiosité, on s'interroge sur un certain nombre de normes qui existaient dans ces sciences curieuses, par exemple l'idéal du secret, de la discrétion. Ces sciences sont disqualifiées non seulement par les hommes de science, mais par le pouvoir politique. Parallèlement, il y a une recomposition de l'alliance entre science et monde clérical : la superstition va être considérée comme de la mauvaise religion.

Comment cette entreprise de mise en ordre se réalise-t-elle ?

Les grands savants ne se contentent pas de faire de la science, mais disent à tout le monde comment il faut la faire : sur la base d'une approche mathématique du monde. C'est le *Discours de la méthode*. Sans aucun doute, Descartes est du côté d'une police de la curiosité. Les académies vont produire des instructions, dire comment observer, quoi collecter et comment le faire si vous partez en expédition scientifique…

C'est un langage de l'ordre, un langage d'Ancien Régime. Tout un ensemble de concepts est alors importé des sciences juridiques, et l'idée de loi de la nature devient majoritaire. La curiosité se réduit aux sciences physiques : elle est plus sûre, plus disciplinée, mais c'est au prix d'une perte.

C'est aussi le cas du côté des institutions : des ségrégations se mettent en place concernant autant les lieux de science – avec l'édification de laboratoires et d'observatoires – et les professions scientifiques que les disciplines. Ce qui va également discréditer les femmes, herboristes, astronomes… La science se masculinise et devient publique, collégiale.

C'est la fin de la culture de la curiosité. Les cabinets sont remplacés par des collections d'histoire naturelle à proprement parler : que l'on pense à Buffon ou Daubenton au Jardin des plantes à Paris… On publie des catalogues, on entretient des correspondances. Le naturaliste suédois Linné met en place toute une ingénierie, à la fois pour compléter l'inventaire du monde naturel et pour mettre en ordre toutes ces observations. L'idée n'est plus, comme sous Aristote, de reconnaître un monde dont on connaît déjà l'ensemble des éléments, qu'il suffirait de découvrir. La

curiosité vise aussi à remplir les blancs. On se rend compte que la nature a une histoire.
On commence aussi à parler d'expérimentation : le scientifique est un démiurge qui produit des êtres de laboratoire, qui reconstitue artificiellement des phénomènes naturels pour mieux les mesurer. L'universalité des sciences n'est plus justifiée par un ordre divin, mais par la vérification expérimentale.

On se met donc à contrôler la science ?
La fraude, la mauvaise science, les *fake news*… Cela fait longtemps qu'elles existent ! Les académies deviennent des sortes de tribunaux qui vont discriminer la bonne science d'avec les résultats extravagants. Quelqu'un prétend avoir traversé la Seine avec des sabots élastiques ? On mène une enquête. Et l'on répudie certaines traditions, comme celle des sceptiques, très forte à la fin du Moyen Âge et à la Renaissance, parce qu'elles maintiennent un doute. Celui-ci va être de plus en plus encadré : si c'est un doute méthodique à la Descartes, passe encore… Progressivement va par la suite s'imposer une position plus ouverte, avec une définition probabiliste des sciences grâce au développement des statistiques. Le doute est quantifié : il devient marge d'erreur.

Que devient cette science avec la découverte d'autres civilisations, à partir de la Renaissance ?
En se déplaçant dans les mondes non européens, vus comme une source de merveilleux au moment où celui-ci déserte l'Occident, on va se rendre compte qu'il y a là des archives scientifiques qui attendent, des mesures astronomiques par exemple. Mais surtout que dans ces nouveaux mondes, des gens font profession de science : les sanskritistes en Inde, les naturalistes chinois… On parle toujours de l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert. Mais en Chine, sous l'empereur Qianlong, au XVIIIe siècle, est rédigée une encyclopédie multivolumes. Et au Japon existe une grande tradition d'albums réalisés à partir d'images concernant la reproduction, les végétaux ou encore les animaux. En Afrique aussi, on trouve des musulmans astronomes, des collections d'histoire naturelle. Et l'on négocie pour avoir ces savoirs. Dans les deux sens ! Ce n'est pas : *« À nous la science, à eux les savoirs vernaculaires. »*
La différence, c'est que ces cultures n'ont pas, comme la nôtre, un naturalisme réducteur. Elles n'ont pas perdu le rapport au merveilleux. Au Japon, les traités d'histoire naturelle du XVIIIe siècle comportent des *kappas*, des êtres imaginaires. Ce qui sera poursuivi dans la tradition manga ! Les Pokémon, c'est l'illustration même de ce goût pour l'histoire naturelle : une collection d'êtres imaginaires. Il faut donc rompre avec cette idée que nous, Occidentaux, aurions tout inventé et diffusé via nos empires.

> « Il faut rompre avec cette idée que nous, Occidentaux, aurions tout inventé et diffusé via nos empires

Cela nous apprend-il quelque chose sur ce que nous devons faire ?
Il faudrait une autre curiosité, plus inclusive. Ce qui passe déjà par une forme de reconnaissance de la conceptualisation de la nature et des pratiques savantes non occidentales. Mais il faut aussi considérer que les savoirs vernaculaires, ce n'est pas rien. On sait qu'il y a une cartographie autochtone en Polynésie, en Mélanésie, chez les Amérindiens d'Amérique du Nord…

Une dernière question, plus personnelle… Pourquoi êtes-vous devenu « curieux de profession », c'est-à-dire chercheur ?
Le goût de l'enquête ! C'est ce qui passionne l'historien : rendre intelligible ce monde disparu. Et le considérer comme un laboratoire. Les sociétés du passé peuvent nous en apprendre sur le présent, non parce qu'elles auraient une sorte de protomodernité, mais parce qu'on peut y tester des problématiques. Par exemple sur l'environnement : que se passe-t-il dans les époques révolues concernant la forêt, le climat ? Et ce qui m'intéresse dans les sciences plus anciennes, c'est justement qu'elles ne sont pas complètement hiérarchisées : la curiosité y est beaucoup plus large !

PROPOS RECUEILLIS PAR FLORENCE LEROY ET VINCENT REA
PHOTOS : RICHARD PAK POUR SCIENCES ET AVENIR

AU-DELÀ DE NOS TÊTES

Quand des mamelles pendent du ciel ! Ces protubérances appelées mammatus ou mamma se forment à la base de différents types de nuages, notamment par temps d'orages violents. Ici, au Canada.

MICHAEL JOHNSTON/APOD.NASA.GOV

MÉTÉOROLOGIE

Des **nuages** comme s'il en pleuvait

Les jeux du vent et de la mécanique des fluides font naître dans le ciel les formes les plus imprévisibles : goutte, virgule, lentille, boudin ou même bonnet phrygien… Des volutes que les météorologues étudient et classent scrupuleusement.

« Qui donc comprendra le déploiement des nuages ? », se demandait déjà le pauvre Job dans l'Ancien Testament (Job, 36, 29). Deux mille cinq cents ans plus tard, rien de nouveau sous le soleil : il est souvent difficile d'identifier ces volutes aériennes, et plus encore d'expliquer leur formation. La combinaison entre les valeurs de température, pression, hygrométrie et la force du vent, confère à ces condensations d'eau des formes multiples et souvent étonnantes. Mais pour les reconnaître, encore faut-il qu'elles soient classées. On doit au pharmacien britannique Luke Howard, en 1802, les premiers noms : cirrus (en boucle de cheveu), stratus (étendu) ou cumulus (en amas). La même année, le Français Lamarck parle quant à lui, dans la langue de Molière, de « diablotins », « coureurs », « demi-terminés », « en balayures » ou « en lambeaux ». Le latin prendra le dessus…

Suivant l'altitude et la forme des nuages, les météorologues en sont arrivés à les cataloguer en dix genres, que l'Organisation météorologique mondiale (OMM) décrit depuis 1975 dans son *Atlas international des nuages*, remanié en 1985 puis en 2017, et désormais en accès libre sur Internet. Dans nos régions tempérées, en dessous de 2 000 mètres d'altitude, on trouve les stratus en couches généralement grises et uniformes, les stratocumulus en bancs ◆◆◆

Les lenticularis se manifestent à la cime des montagnes, comme ici en Patagonie (Argentine), quand le vent qui frappe le sommet génère une baisse de pression en montant, puis une hausse en redescendant, formant cet empilement caractéristique.

ALAMY/PHOTO12

◆◆◆ ou nappes gris et/ou blanchâtres, les cumulus à base horizontale et qui s'élèvent comme des choux-fleurs, et les plus denses et puissants, les cumulonimbus en forme de tour. Entre 2 000 et 7 000 mètres se forment les nappes d'altocumulus, composées de petits nuages blancs fibreux séparés ou non les uns des autres, les couches uniformes d'altostratus qui laissent filtrer le soleil, et les nimbostratus, sources de pluie abondante. Entre 5 000 et 13 000 mètres nichent les bandes blanches et étroites des cirrus, les cirrocumulus composés de très petits éléments en forme de granules ou de rides, et les voiles de cirrostratus, très étendus et engendrant souvent un phénomène de halo. Ces dix genres peuvent être subdivisés en quelques espèces, suivant la morphologie et la structure des nuages. Ainsi, un cirrus peut être uncinus s'il est en forme de virgule ou terminé par un crochet. Mais encore fibratus s'il pré-

Faire la pluie et le beau temps, une vraie-fausse bonne idée

Agir sur les nuages pour faire pleuvoir? C'est le principe de la géo-ingénierie, que ses supporters vantent pour modifier le temps. Et ce, avec des desseins différents. Les États-Unis, de 1967 à 1972, ont envoyé des paillettes d'iodure d'argent dans les nuages du Viêt Nam afin d'augmenter la taille des gouttelettes, ce qui a fait pleuvoir artificiellement. Leur but? Enrayer la progression des Viêt Minh. Moins guerrière, la Chine a disséminé son iodure d'argent dans l'air pékinois avant les jeux Olympiques de 2008, afin de ne pas gâcher la cérémonie d'ouverture et de diminuer la pollution. Depuis, elle a poursuivi dans cette voie. Elle a ainsi annoncé en 2020 augmenter sa surface de *« modification des pluies »* de 5,5 millions de kilomètres carrés d'ici à 2025. D'autres veulent faire la pluie sans le beau temps pour abaisser la température. En effet, les nuages réfléchissent une partie du rayonnement solaire, qui n'atteint alors pas les basses couches de l'atmosphère, ce qui amoindrit l'effet de serre. Mais est-ce efficace? Cette géo-ingénierie est sujette à caution. Certains ne veulent y voir que les effets bénéfiques à court terme, d'autres accusent ses tenants d'être des apprentis sorciers, tant la mécanique des fluides, qui régit l'évolution du climat, est peu maîtrisable.

CATERS/SIPA

Les fluctus, du latin « vague », se forment à la limite supérieure du nuage lorsque, sous l'effet de forts vents d'altitude, une masse d'air chaud et sec se déplace plus rapidement que la couche froide située en dessous.

GETTYIMAGES

Le volutus, en rouleau et d'un seul tenant, se produit le long d'un front formé par deux vents contraires. Il s'observe comme ici en Argentine, en Australie – sous le nom de *morning glory* – mais aussi à Toulouse !

sente des filaments rectilignes, spissatus s'il est assez dense pour paraître grisâtre, castellanus s'il se termine vers le haut par des tours crénelées. Une même espèce peut s'appliquer à deux genres différents, et l'on trouve ainsi des cirrus fibratus et des cirrostratus fibratus. Ces genres et espèces peuvent même être affublés d'adjectifs, désignant des variétés, ayant elles-mêmes parfois des particularités. De véritables poupées russes !

Certaines particularités insolites ont été officiellement reconnues depuis 2017 par l'OMM, ainsi qu'une espèce, le volutus, que les Australiens appellent *morning glory* car il apparaît souvent le matin. Ce nuage, appartenant au genre des altocumulus, évoque un rouleau compresseur aérien. Il se présente comme une longue masse nuageuse horizontale isolée, en forme de tube, qui souvent semble s'enrouler lentement autour d'un axe horizontal. *« Quand deux vents se font face, des tourbillons apparaissent au niveau du front, ce qui forme ces boudins*, explique Sébastien Laflorencie, enseignant à l'École nationale de météorologie. *Il n'y en a pas qu'en Australie. J'en ai déjà vu à Toulouse ! »*

Bien que ce soit la thermodynamique – les différences de température et de pression, ainsi que la vitesse du vent – qui régisse les formes des nuages, la dynamique seule, par le biais du vent, déploie ainsi son lot de formations spectaculaires. Comme ces nuages lenticulaires, d'une espèce appartenant au genre cumulus, souvent observés à la cime des montagnes… et parfois pris pour des ovnis du fait de leur forme de soucoupe volante. Ils se manifestent lorsque le vent qui frappe le sommet génère une baisse de pression en montant, puis une hausse en redescendant. À l'endroit précis où la pression et la température atteignent le point de ◆◆◆

Un atlas pour répertorier les nuages

L'Atlas des nuages est aux météorologues ce que les tables de multiplication sont aux mathématiciens. Depuis 1975, date de sa création, c'est la base culturelle des ingénieurs météo. Il ne sert cependant pas directement pour les prévisions : aujourd'hui, les simulations numériques permettant d'élaborer les bulletins nécessitent surtout une énorme quantité de données chiffrées, qui proviennent à 95 % des observations satellitaires, le reste étant issu des relevés de température, de vitesse du vent, d'hygrométrie et de pression pris depuis le sol par les stations météo professionnelles et amateurs. Mais la forme des nuages présents dans le ciel précise les conditions globales du temps, et c'est là qu'intervient l'Atlas.

***« Les photos prises par les amateurs complètent les images satellitaires par les détails précis qu'elles apportent »*, assure Jessica Taylor, du centre de la Nasa de Langley (États-Unis). La physicienne est responsable scientifique du projet Globe Observer, auquel contribuent 220 000 enseignants, élèves ou simples citoyens. L'Atlas international est la référence de tous ces scientifiques bénévoles lorsqu'ils veulent connaître la nature du nuage qu'ils ont photographié.**

BOBBY BOYTOT/ATLAS INTERNATIONAL DES NUAGES

Le cavum désigne une zone dégagée, circulaire ou linéaire, à l'intérieur d'une mince couche de nuages. Ici, un sillon créé par la traînée de dissipation d'un avion.

◆◆◆ rosée, la vapeur d'eau se condense en fines gouttelettes, formant le nuage, nettement délimité. *« On peut aussi voir apparaître des lenticularis sans qu'il y ait de montagne*, remarque Sébastien Laflorencie. *On en observe parfois au sommet de certains cumulus, qui font office de relief. On parle alors de capuchon ou de pileus, comme ce bonnet en feutre qui, dans la Rome antique, coiffait les esclaves affranchis. »*

L'une des « particularités » inscrites en 2017 concerne les altocumulus. C'est l'asperitas (brutal en latin), particularité de la variété undulatus (en forme d'ondes) à cause des ondulations observées sous la base des nuages. *« Il a l'aspect d'une mer agitée vue de dessous*, décrit Sébastien Laflorencie. *C'est un effet de l'écoulement de l'air, qui comme tout fluide a un comportement chaotique. »* Selon l'Atlas international, les effets visuels spectaculaires que peuvent offrir ces formations, connues aussi sous le nom de « rivières du ciel », sont dus à d'infimes différences de luminosité et d'épaisseur. De l'autre côté des nuages, les fluctus sont des vagues formées non à la base, mais au sommet des stratocumulus, conséquence d'une instabilité due à la variabilité de la vitesse du vent, comme les vagues déferlantes sont un effet du vent en mer.

Enfin, les nuages les plus bizarres sont sans doute ceux d'où pendent des mammatus ou mamma, associés à de nombreux genres (cirrus, cirrocumulus, altocumulus, altostratus, stratocumulus, cumulonimbus) et qui évoquent des mamelles. Dans le cas des cumulonimbus, ces protubérances sont dues à des courants d'air descendants conduisant à l'effondrement du nuage vers une zone très sèche dans laquelle la partie inférieure s'évapore, ce qui diminue la température du fait de l'énergie que cette transformation demande. La couche inférieure ne subissant pas uniformément cette transformation, il se crée des mouvements convectifs, formant ces boules nettes qui semblent pendre.

Tout ce qui agit sur l'atmosphère participe ainsi peu ou prou à la formation des nuages… y compris l'être humain ! Pour preuve, les panaches thermiques qui se dégagent des centrales électriques – nucléaires et à charbon –, ou bien les traînées de condensation persistantes laissées par les avions, qui forment des cirrus homogenitus. *« J'ai étudié un nuage produit par une fusée lancée le 23 février 1971 au coucher du soleil vers la haute atmosphère*, raconte Jean Dessens, ancien directeur du centre de recherches atmosphériques de Lannemezan (Hautes-Pyrénées). *Situé à environ 70 kilomètres d'altitude, il était si haut qu'il ressemblait aux nuages polaires noctulescents »* – qui brillent la nuit. Un phénomène rarissime. *« Les nuages les plus bizarres sont bien ceux que nous créons nous-mêmes »*, ajoute le chercheur. C'est d'ailleurs ce qu'il a fait, avec son équipe, dans le but de parvenir à réduire la taille des grêlons qui endommagent régulièrement les récoltes pyrénéennes. Il a tenté de créer dans une colonne d'air chaud une instabilité en y envoyant des paillettes d'iodure d'argent, afin de multiplier le nombre de noyaux solides autour desquelles se fixe l'eau et donc de diminuer la taille des grêlons ainsi formés. En vingt ans, il est bien parvenu à former des nuages, mais rarement de la pluie, et encore moins de la grêle. *« Cela nous aura du moins permis d'étudier la formation des gouttelettes* in situ *»*, se souvient-il. Quant à comprendre finement les nuages, c'est une autre affaire. La mécanique des fluides, qui régit leur formation, est une science non linéaire. On ne peut pas prévoir leur évolution à long terme tellement le chaos règne dans les équations : une toute petite différence dans les données amène à des résultats de simulation très différents en peu de temps. Job avait sans doute raison.

JACQUES-OLIVIER BARUCH

PATRICK BESSE

« LES NUAGES LES PLUS BIZARRES SONT CEUX QUE NOUS CRÉONS NOUS-MÊMES »

Jean Dessens, ancien directeur du Centre de recherches atmosphériques de Lannemezan

L'Atlas international des nuages de l'OMM : sciav.fr/OMM

L'application Global Observer, disponible sur App Store et Google Pay : sciav.fr/globalobserver

Le projet collaboratif de description des nuages de Zooniverse : sciav.fr/zooniverse

La Cloud Appreciation Society : sciav.fr/cloudsociety

OVNI

« 99 cas de “soucoupe volante” restent inexpliqués malgré nos enquêtes »

À Toulouse, le Geipan étudie chaque année près de 700 signalements de phénomènes aérospatiaux non identifiés, précise son directeur. La plupart avec succès… Mais certains résistent à l’analyse.

Voit-on encore beaucoup de soucoupes volantes de nos jours ?
Au Geipan, le groupe du Centre national d’études spatiales (Cnes) chargé depuis 1977 d’étudier les phénomènes aérospatiaux non identifiés (Pan), nous recevons environ 700 signalements par an, dont 500 sont traités par échanges de mails avec le témoin car leur explication est simple. En complément, nous ouvrons 150 à 200 enquêtes par an. Nous traitons tout témoignage de « soucoupe volante » ! Mais nous n’utilisons pas ce terme ou ceux de « petits hommes verts » ou « ovnis », même s’ils ne sont pas tabous. Notre mission est d’expliquer de façon rationnelle toutes les étrangetés vues, perçues ou vécues.

VINCENT COSTES

VINCENT COSTES
Directeur du Groupe d’étude et d’informations sur les phénomènes aérospatiaux non identifiés (Geipan)

Qui sont les témoins, et quelles sont les explications courantes des phénomènes qu’ils observent ?
Ce sont Monsieur ou Madame Tout-le-Monde, confronté(e) à une observation insolite, inattendue, qu’il ou elle ne peut s’expliquer clairement. C’est ce manque d’explication qui crée l’étrangeté. L’émotion peut s’inviter, la mémoire jouer des tours… Et la croyance aux extraterrestres rend parfois le témoignage complexe à analyser.
Les phénomènes les plus classiques décrits sont en réalité des lanternes volantes, des avions, des montgolfières, des météorites, des étoiles, des planètes ou des satellites…
Mais il y a toujours une singularité : une faible luminosité, l’absence de bruit, des turbulences de l’atmosphère… Une bougie de lanterne qui s’éteint peut tout à fait être perçue comme un objet qui s’échappe à une vitesse extrême.

Auriez-vous un exemple d’observation spectaculaire ?
Le 21 avril dernier, le lancement de cinquante-trois satellites Starlink, passés au-dessus de la France, a donné lieu à de nombreux récits d’une sphère lumineuse accompagnée d’un point ou d’une barre.

Quelle démarche adopte le Geipan face à un signalement ?
Notre mission commence par le recueil du témoignage, qui peut s’appuyer sur des photos ou des vidéos. Pour l’étudier, nous utilisons une multitude d’applications et de logiciels astronomiques, aéronautiques, spatiaux, mais aussi les expertises de nos partenaires, notamment l’armée de l’air qui permet de restituer les trajectoires d’avions par cartes radar, et Météo-France, qui fournit les conditions météorologiques exactes. Nous disposons aussi des ressources internes au Cnes, comme les traces très nettes de satellites et de débris.
Prenons un exemple : un astronome amateur observe un flash lumineux dans le ciel, qu’il ne peut expliquer à l’aide des applications grand public. Une expertise interne montrera la présence d’un satellite, et donnera l’explication : un reflet du soleil sur ce dernier. Nous sommes parfois amenés à réaliser une enquête de terrain, qui nous permet d’analyser précisément la configuration de l’observation et de réaliser un entretien avec le témoin, afin de faire émerger le plus d’informations fiables possibles. Dans les cas les plus difficiles, un comité d’experts pluridisciplinaires se réunit.

Des phénomènes restent-ils inexpliqués ?
Quatre-vingt-dix-neuf cas n’ont pas reçu d’explication satisfaisante malgré des données suffisantes pour l’analyse technique, soit 3,3 % de nos 3000 cas publiés. Nous les mettons en ligne anonymement sur notre site, lorsque le témoin nous en a donné l’autorisation.

PROPOS RECUEILLIS PAR LAUREEN BOUYSSOU

JOHN FINNEY/GETTY IMAGES

Ceci n'est pas une hallucination mais un spectre de Brocken : l'ombre portée d'un promeneur sur une nappe de brouillard, nimbée d'un halo.

PHOTOMÉTÉORES

Lumineuses apparitions

Mirages, arcs-en-ciel, halos, rayons verts… De nombreux phénomènes atmosphériques sont engendrés par la déviation de la lumière du Soleil par l'air ou l'eau. Des spectacles aussi saisissants qu'éphémères.

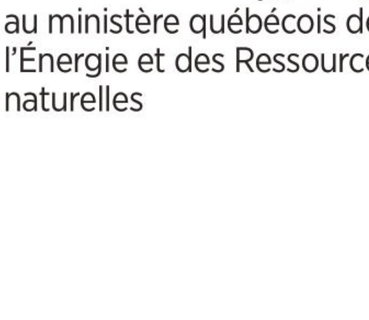
En entrant dans l'atmosphère, la lumière induit parfois d'étranges phénomènes, baptisés photométéores – du grec *photos* (lumière) et *meteoros* (dans les airs). Le plus connu est l'arc-en-ciel, qui se produit lorsque le Soleil surgit derrière nous après l'averse, dans une atmosphère encore gorgée d'humidité. En passant de l'air à l'eau, la lumière blanche de l'astre, addition de toutes les ondes électromagnétiques visibles, se réfracte – dévie – et se sépare en rayons de différentes couleurs. Violet, bleu, vert, jaune, orange, rouge se dispersent dans chaque gouttelette, selon un angle qui dépend de leur longueur d'onde. Les rayons se réfléchissent partiellement sur la surface opposée de la goutte, avant d'être de nouveau réfractés en sortant. Mais pourquoi voyons-nous les couleurs dans cet ordre ? Tout simplement, encore, pour une question d'angle : les gouttelettes, selon leur position, réfractent des couleurs différentes vers l'œil de l'observateur : les plus hautes, le rouge, les plus basses, le bleu. Un arc secondaire, résultant d'une double réflexion de la

LUEURS SISMIQUES

La tectonique des flashs

Le 8 septembre 2017, un séisme de magnitude 8,2 frappe Mexico. Des vidéos d'éclairs colorés font le tour des réseaux sociaux. Il pourrait s'agir de lueurs sismiques rares… *« Les premières compilations sur le sujet datent des années 1800»*, souligne Robert Thériault, géologue au ministère québécois de l'Énergie et des Ressources naturelles, qui a analysé le contexte géologique de 65 incidents lumineux survenus de 1600 à 2014. Sphères, flashs, langues de « feu », colonnes surgies de terre… Ces lueurs variées se produisent pendant les secousses, voire quelques semaines avant, jusqu'à 150 kilomètres de l'épicentre, et le plus souvent lors de séismes de magnitude supérieure à 5.

En outre, *« dans 85 % des cas, on les observe à proximité de profondes failles verticales intra-continentales »,* précise le chercheur. Que se passerait-il ? *« Le stress dans les roches dû aux ondes sismiques ou aux contraintes précédant un séisme générerait des charges électriques positives qui migreraient vers la surface »,* suggère Robert Thériault. Les molécules d'air se chargeraient alors en énergie et cette ionisation provoquerait les lumières. Des tests en laboratoire ont par ailleurs démontré que les roches riches en magnésium et en fer que l'on trouve le long de ces failles génèrent davantage de charges électriques positives que les roches quartzo-feldspathiques, tel le granit. Le lien direct entre les roches ferromagnésiennes et ces étranges phénomènes lumineux reste toutefois à démontrer. **LAUREEN BOUYSSOU**



ROBERT THERIAULT

« DANS 85 % DES CAS, ON LES OBSERVE À PROXIMITÉ DE PROFONDES FAILLES VERTICALES INTRA-CONTINENTALES »

Robert Thériault, géologue au ministère québécois de l'Énergie et des Ressources naturelles

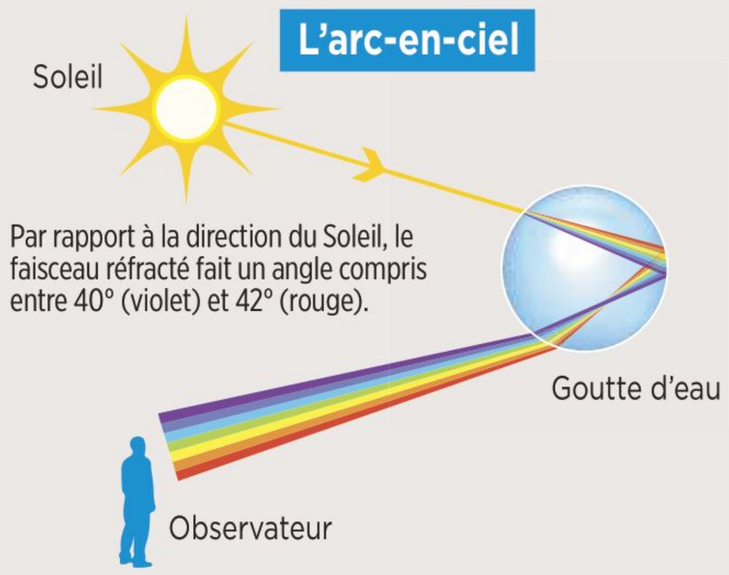
lumière contre les parois de la goutte, est parfois visible. Mais il existe bien d'autres photométéores. Les halos, par exemple, dus à la réfraction de la lumière dans des cristaux de glace de forme hexagonale, souvent dans des cirrus d'altitude. Le Soleil ou la Lune apparaissent alors entourés d'un anneau lumineux de 22 °, parfois de 46 °, soit l'angle de réfraction à travers les cristaux qui redistribuent la lumière solaire ou lunaire. Ils s'accompagnent parfois d'un cercle horizontal blanc sur lequel peuvent apparaître deux répliques de l'image de l'astre, ou parhélies. Les cristaux de glace en suspension peuvent aussi occasionner l'apparition d'une colonne lumineuse au-dessus et au-dessous du Soleil ou de la Lune, bas sur l'horizon.

Autre spectacle saisissant : le spectre de Brocken, du nom du point culminant de la chaîne allemande du Harz. Si vous gravissez cette montagne, vous apercevrez peut-être une immense silhouette sombre et mouvante, qui n'est autre que… l'ombre du marcheur que vous êtes se formant sur un nuage ou une nappe de brouillard en contrebas. Ce spectre, qui s'observe en bien d'autres lieux, apparaît parfois en gloire : l'ombre portée sur les gouttes d'eau en suspension est entourée d'anneaux aux couleurs de l'arc-en-ciel.

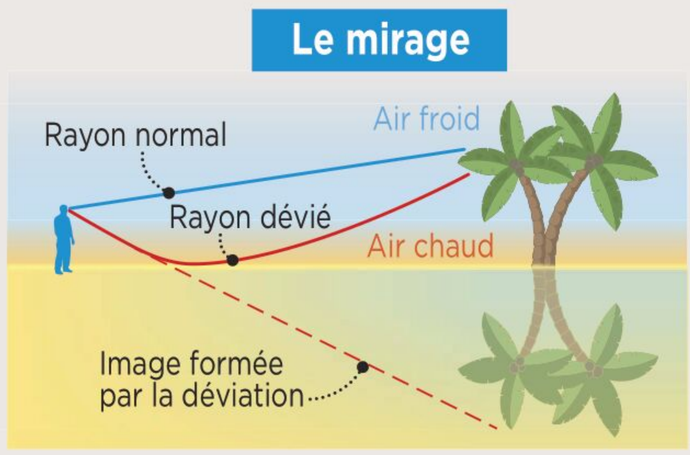
Quant aux mirages, ils se produisent lorsque la température de l'air n'est pas homogène. Au lieu de se propager en ligne droite, les rayons lumineux sont alors courbés. On observe donc l'image dans la direction tangente au rayon lumineux parvenant à l'œil. Vers le bas – c'est le mirage inférieur – si la température au sol est plus élevée qu'en altitude : l'image miroir se forme plus bas ou plus près que l'objet ne l'est en réalité. Vers le haut – mirage supérieur – lorsque la température de l'air est bien plus élevée que celle de la surface. Vous pouvez alors voir un navire léviter sur les eaux ! Le plus impressionnant des mirages fut baptisé fata Morgana par les croisés, qui rapportèrent la vision d'un château flottant au-dessus du détroit de Messine, œuvre, selon eux, de la fée Morgane.

Le rayon vert n'est, quant à lui, visible que quelques secondes au-dessus du Soleil levant ou couchant. Les rayons rasants sont déviés par la réfraction atmosphérique qui occasionne un effet de dispersion, avec l'apparition d'une bordure verte au sommet de l'étoile. Lorsqu'un mirage inférieur se produit simultanément, une extrémité du Soleil apparaît en suspension et délivre ce rayon vert aux yeux du spectateur, à qui Jules Verne promet qu'il verra alors clair dans son cœur et dans celui des autres. **FRANÇOIS FOLLIET**

Détournement de rayons



En entrant dans la goutte, les rayons solaires sont réfactés. Ils se dispersent en différentes couleurs et se réfléchissent sur la face opposée de la goutte avant d'être à nouveau réfractés, en en sortant.



Lorsque le sol est surchauffé, la couche d'air chaud courbe les rayons lumineux vers le bas. Or, l'œil les interprète comme s'ils étaient rectilignes. L'observateur voit donc l'image au sol.

BRUNO BOURGEOIS

FOUDRE EN BOULE

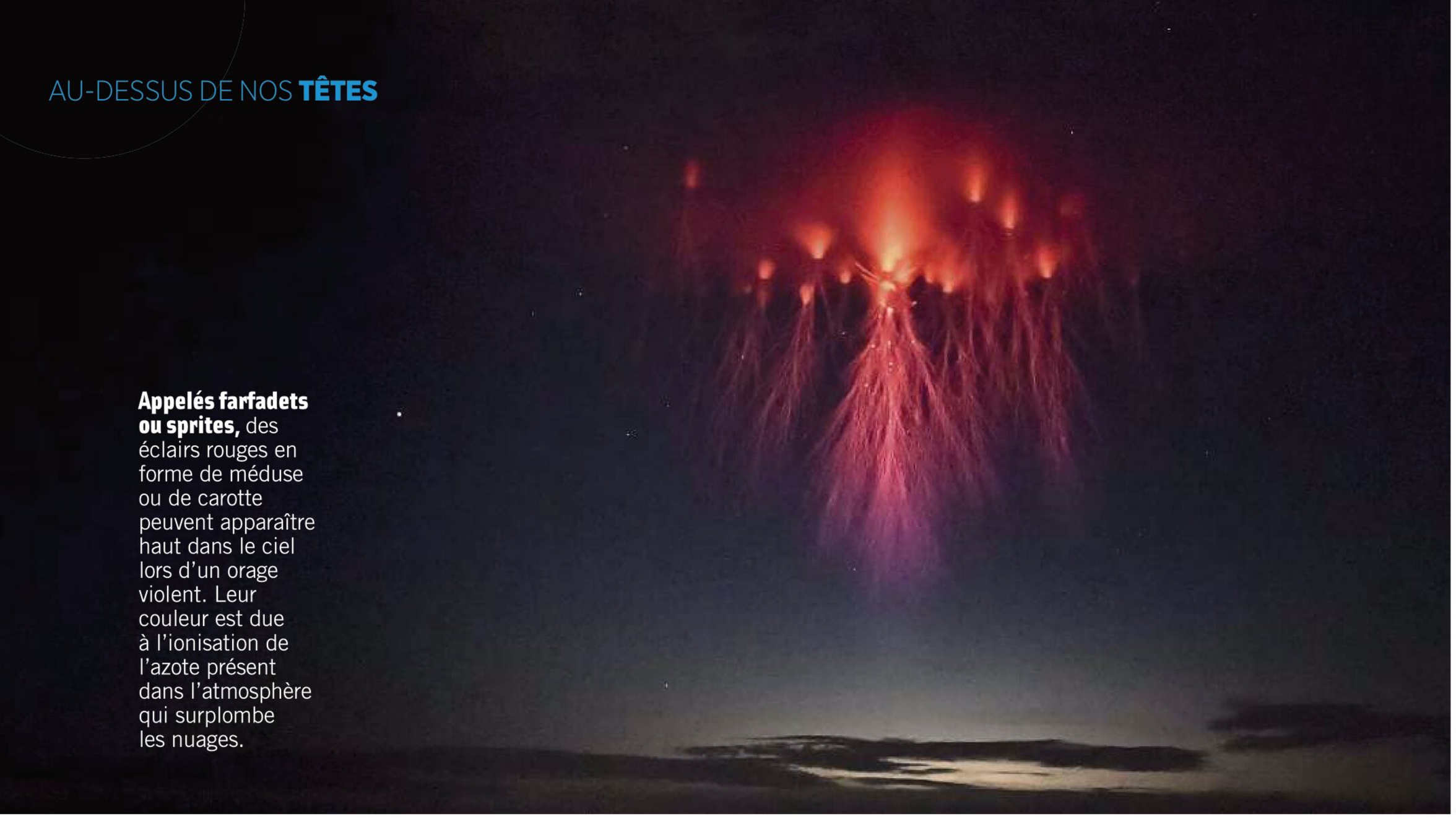
Des sphères qui sentent le soufre

Ce phénomène est si singulier que la plupart des scientifiques qui l'étudient n'ont jamais eu la chance de l'observer dans la nature ! Pourtant, la foudre en boule existe : quantité de témoignages en attestent, relativement concordants, une fois dépoussiérés des croyances inévitablement convoquées par le témoin devant cet étrange et parfois terrifiant ballet lumineux. Il se manifeste généralement au cours d'un orage, sous forme de petites boules iridescentes d'une dizaine de centimètres de diamètre, constituées d'une lumière d'apparence solide, comme le plasma d'un volcan. Après avoir évolué au-dessus du sol une poignée de secondes dans une odeur de soufre, les sphères se désagrègent dans l'air.

Parmi les multiples théories évoquées – mini-trous noirs se formant en contact avec la Terre, débris d'antimatière ou réactions nucléaires provoquées par les éclairs –, certaines ne semblent pas totalement farfelues. En 2012, par exemple, une équipe australienne montrait comment la foudre en boule pouvait apparaître à l'intérieur d'une maison, même sans issue : à la suite de déséquilibres électromagnétiques provoqués par un orage, des flux d'ions perturbés par ces différences de tension entre intérieur et extérieur s'accumulent sur la surface des fenêtres, créant de l'autre côté de la vitre un champ électrique engendrant une boule de plasma d'ions.

Séduisant… mais ce n'est qu'un modèle. En 2019, le Russe Vladimir Torchigin avançait quant à lui que la foudre en boule pourrait être constituée de photons ricochant à l'intérieur d'une bulle d'air comprimé résultant du champ électrique généré par les rayons lumineux. Intrigant… mais, une fois de plus, ce n'est qu'un modèle physico-mathématique. La foudre en boule n'est pas près de se laisser capturer.

HERVÉ RATEL



Appelés farfadets ou sprites, des éclairs rouges en forme de méduse ou de carotte peuvent apparaître haut dans le ciel lors d'un orage violent. Leur couleur est due à l'ionisation de l'azote présent dans l'atmosphère qui surplombe les nuages.

STEPHEN C HUMMEL

PHÉNOMÈNES LUMINEUX TRANSITOIRES

Au-dessus des nuages, d'étranges éclairs...

Lors d'un orage particulièrement puissant, il arrive que des jets de filaments rouges en forme de colonnes, de méduses ou encore de carottes émergent au-dessus de l'énorme cumulonimbus. Aussi beaux que difficiles à capturer, ces phénomènes lumineux transitoires, visibles seulement quelques millisecondes, nommés sprites (lutins, en anglais), farfadets ou encore sylphes rouges, ont été découverts par hasard en 1989. *« Des chercheurs de l'université américaine du Minnesota les ont repérés en essayant une nouvelle caméra à haute résolution. Ils visaient une étoile et sur l'axe, il y avait un orage, raconte Sébastien Célestin, physicien à l'université d'Orléans, spécialiste des effets des orages sur l'atmosphère. À l'œil nu, on ne perçoit qu'un flash lumineux dans le ciel. Pour avoir une chance de visualiser des sprites, je conseille de filmer l'orage et de passer la vidéo au ralenti. »*

Trente ans après la confirmation de leur existence, on sait que ces phénomènes surviennent lors de perturbations électriques de la haute atmosphère, entre 40 et 80 kilomètres d'altitude. *« Il faut imaginer le nuage d'orage comme une énorme pile, avec des charges négatives en bas et au centre, et des charges positives au sommet »*, indique le chercheur. Certains éclairs, entre le nuage et la terre, collectent et transportent une grande partie des charges positives du nuage vers le sol. Le nuage devient alors chargé négativement, à la différence de l'atmosphère qui le surplombe – l'ionosphère – chargée, elle, positivement. Ce déséquilibre entraîne la formation d'un champ électrique très loin au-dessus du nuage. Une décharge électrique peut alors se produire, exciter des molécules qui libèrent de l'énergie sous forme de couleur et générer un sprite, lequel doit sa couleur rouge à l'ionisation de l'azote présent dans l'ionosphère.

Au-delà des conditions de leur apparition, on a aussi découvert, au fil des années, que les sprites étaient bien plus fréquents qu'imaginé, et qu'ils pouvaient être générés dans tout orage de grande ampleur, à toutes les latitudes. *« Quelques zones – les Grandes Plaines aux États-Unis, la Méditerranée ou encore le Brésil – sont toutefois particulièrement touchées par des orages producteurs de sprites »*, précise Sébastien Célestin, qui déplore la perte du lanceur Vega transportant le satellite Taranis du Cnes, en novembre 2020. L'objectif scientifique de cette mission était justement d'étudier les phénomènes lumineux transitoires de la haute atmosphère pendant les orages. *« On en attendait tellement »*, regrette-t-il. Si une mission Taranis 2 a bien été évoquée dans la foulée de cet échec, il semble que le projet ne soit plus d'actualité.

MARINE CYGLER

SÉBASTIEN CÉLESTIN

« POUR AVOIR UNE CHANCE DE VISUALISER DES SPRITES, JE CONSEILLE DE FILMER L'ORAGE ET DE PASSER LA VIDÉO AU RALENTI »

Sébastien Célestin, physicien à l'université d'Orléans

SUPER-LUNE

Ni plus grosse, ni très rousse !

PAUL KANE/GETTY IMAGES

La super-Lune observée le 14 novembre 2016 en Australie fut spectaculaire. L'impression de proximité avec notre satellite n'est pourtant qu'une illusion d'optique.

Ce vendredi 13 juillet, la pleine Lune qui se lève est qualifiée par certains de super-Lune. Quèsaco ? Nous apparaîtrait-elle plus grosse que d'habitude ? Ce jour-là, notre satellite se trouve à 363 666 kilomètres de la Terre… autrement dit tout près de son périgée, le point de son orbite le plus proche de notre planète (357 263 kilomètres), qu'elle a atteint 9 h 30 plus tôt. Par rapport à la pleine Lune de janvier, qui était à 400 779 kilomètres, cela fait une différence d'environ 10 % en distance et donc en taille apparente, soit environ 3 minutes d'angle (1/20e de degré). Impossible, par conséquent, à voir à l'œil nu sans repère. Une super-Lune n'est donc une lune plus grosse que pour… les astronomes, qui mesurent sa taille avec des instruments précis.

Mais la Lune est-elle plus imposante quand elle est basse sur l'horizon que lorsqu'elle est haute dans le ciel ? Non ! Faites l'expérience par vous-même, à la main tendue : cela fait toujours environ un demi-doigt. Alors, pourquoi cette illusion d'optique ? Tout simplement parce que notre cerveau nous joue des tours. Lorsque deux objets sont situés à des distances différentes mais sur des lignes de visée très proches, notre vision tend à dilater celui qui est situé au second plan. La Lune à l'arrière de collines, d'arbres ou de bâtiments nous paraît ainsi plus massive que lorsqu'elle est haut dans le ciel et qu'aucune comparaison n'est possible avec un premier plan.

Question couleur, c'est encore une autre affaire ! Quand la Lune se lève ou se couche, les rayons lumineux du Soleil qui l'éclaire traversent des couches plus denses de l'atmosphère terrestre. Les plus énergétiques (bleus, verts) sont alors absorbés et diffusés dans le ciel. Seuls les rayons jaunes et rouges parviennent à atteindre notre satellite. D'où son apparente couleur orangée.

C'est également le cas lors des éclipses de Lune, où cette teinte est d'autant plus prononcée que des poussières sont présentes dans l'atmosphère terrestre.

En revanche, la Lune rousse du mois d'avril n'a rien à voir avec ce phénomène. On la qualifie ainsi car les feuilles et bourgeons sont alors souvent brûlés – roussis – par une gelée tardive… À fortiori lorsque le ciel est dégagé et que la Lune apparaît dans toute sa splendeur. **JACQUES-OLIVIER BARUCH**

PLANÉTOLOGIE

Des diamants tombés du ciel

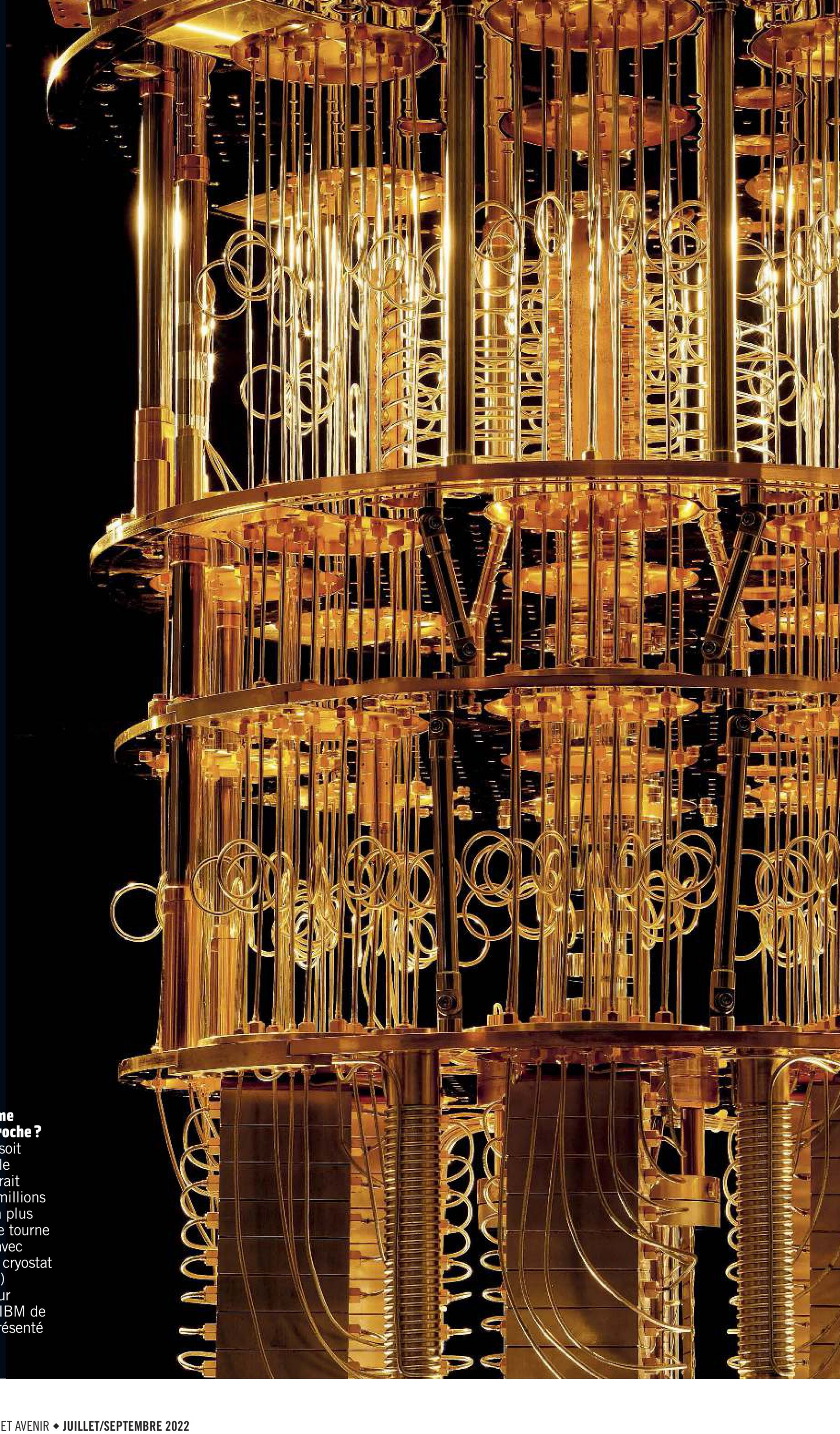
Pleuvrait-il des diamants dans l'atmosphère de Neptune et d'Uranus ? La question date de quarante ans, après le survol de ces planètes par les sondes Voyager. Elle vient de la constatation que l'atmosphère des deux géantes glacées comporte beaucoup de méthane (CH_4), un hydrocarbure simple qui pourrait se dissocier sous l'effet des pressions et des températures énormes qui règnent au cœur de ces planètes : d'un côté de l'hydrogène, de l'autre du carbone qui, soumis à de hautes pressions, forme des diamants.

Restait à reproduire ces conditions en laboratoire. C'est ce qu'ont fait en 2017 Dominik Klaus, professeur à l'université allemande de Rostock, et ses collègues, en soumettant un hydrocarbure (du polystyrène $[C_8h_8]_n$) à un puissant rayon laser. Ils ont créé une pression de 50 milliards de pascals et une température de 5 000 kelvins, soit les conditions régnant sans doute à 10 000 kilomètres sous la surface nuageuse de Neptune et Uranus. Ils ont alors vu les atomes d'hydrogène et de carbone se dissocier, et observé par diffraction de rayons X… des diamants de quelques nanomètres. *« Le laser crée deux ondes de choc qui, en se rattrapant, induisent un pic de pression, lors duquel les diamants se forment »*, explique Dominik Klaus. En conditions réelles, tombant en pluie dans les basses couches de l'atmosphère d'Uranus et de Neptune, les diamants s'enfonceraient vers le centre et s'agglutineraient en un vaste écrin autour du cœur de ces planètes glacées. Un phénomène qui peut exister au sein d'exoplanètes, comme 55 Cancri B, dans la constellation du Cancer. L'analyse de la lumière qu'elle émet montre qu'elle contient beaucoup de carbone. Les simulations qui ont tenté de reproduire le signal émis ne l'expliquent que par un fort taux de carbone pur et très dense… Du diamant. **J.-O. B.**

« LE LASER CRÉE DEUX ONDES DE CHOC QUI INDUISENT UN PIC DE PRESSION, PENDANT LEQUEL LES DIAMANTS SE FORMENT »

Dominik Klaus, professeur à l'université allemande de Rostock

MATIÈRE ET MATHS



L'ordinateur quantique, une révolution proche ? Pour qu'elle soit utile, une telle machine devrait générer des millions de qubits. La plus perfectionnée tourne aujourd'hui avec 127... Ici, le cryostat (réfrigérateur) de l'ordinateur quantique d'IBM de 50 qubits, présenté en 2017.

IBM QUANTUM RESEARCH

TÉLÉPORTATION

Le **quantique,** c'est fantastique !

Chat à la fois mort et vivant, électrons traversant un mur, photons unis à jamais quel que soit leur sort individuel… La physique quantique est pleine de situations bien réelles et pourtant inconcevables pour l'esprit humain. Même pour celui d'Einstein !

Bienvenue dans un monde où l'on peut se trouver ici et ailleurs, un zoo dans lequel un animal peut être vivant et mort à la fois, un univers où l'on pratique couramment la « téléportation » Cette réalité, c'est celle de la physique quantique, qui décrit lumière et matière à une échelle inaccessible à nos yeux.

Ses concepts sont si étranges que le physicien américain Richard Feynman a dit à son propos en 1964, lors d'une conférence fort sérieuse, devant la salle hilare : *« Je pense pouvoir dire sans risque que personne ne la comprend. »* C'était un an avant de recevoir un Nobel pour sa contribution… à la physique quantique. *« On la conçoit très bien sur le plan scientifique*, nuance Julien Bobroff, professeur de physique à l'université Paris-Saclay. *En revanche, elle échappe totalement à notre intuition. »*

Imaginez par exemple un chat, enfermé dans une boîte bien isolée contenant une fiole de gaz mortel et un atome de radon, dont le noyau est radioactif. Si le radon se désintègre, la particule qu'il émet brise l'ampoule, ce qui tue l'animal. Comment savoir ce qui se passe à l'intérieur de la boîte ? Notre vision classique du monde nous conduit à penser que le chat est mort ou vivant, suivant que le radon s'est désintégré ou pas. Mais si l'on considère cette expérience ◆◆◆

◆◆◆ sous le prisme de la physique quantique, notre cerveau se met en pelote : tout objet quantique peut en effet se trouver dans un état ou un autre, mais aussi dans les deux en même temps. Dit autrement, un « chat quantique » peut être vivant, mort, ou vivant et mort à la fois ! Ce n'est qu'au moment de l'observation que l'on connaîtra sa destinée. Mais attention : la physique quantique nous dit aussi que l'observation d'un état le perturbe ou le détruit ! De même, elle interdit d'en créer une copie parfaite : impossible de cloner un état. En revanche, rien n'empêche de le téléporter instantanément aux confins de notre galaxie, si tant est qu'il y ait quelqu'un pour l'observer… Renversant ! Mais vous allez comprendre pourquoi.

Prenons deux photons émis par un atome dans deux directions opposées. Issus d'un même processus physique – le retour au calme d'un atome excité –, ils ne sont pas étrangers l'un à l'autre : on dit qu'ils sont intriqués, enchevêtrés. « *Tout se passe alors comme si ces deux photons ne formaient qu'un seul objet quantique* », résume Julien Bobroff. La physique des quanta montre que toute mesure sur l'un nous renseignera sur l'autre. Un peu comme deux dés qui donneraient à chaque lancer un résultat aléatoire mais dont la somme serait systématiquement 6. Quand ces objets sont proches, on pourrait imaginer que

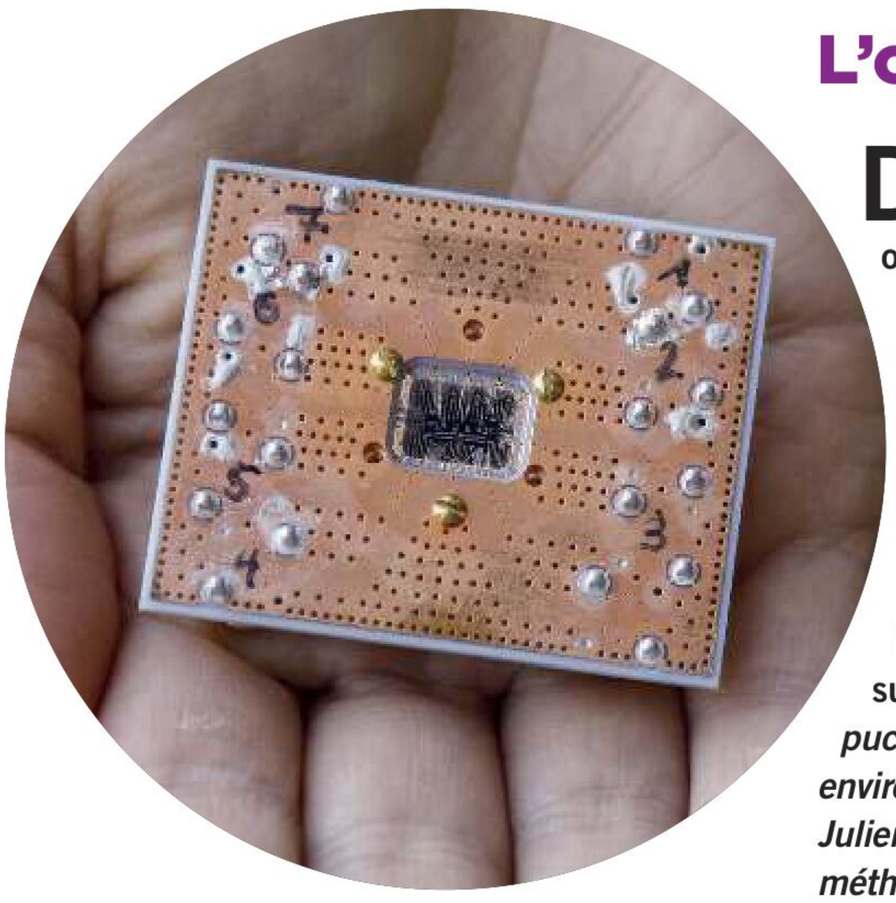
JULIEN BOBROFF

« CE QUI EST DÉCOIFFANT, C'EST QUE L'INTRICATION EST CONSERVÉE QUAND ON ÉLOIGNE LES OBJETS À GRANDE DISTANCE, MÊME À PLUS DE MILLE KILOMÈTRES ! »

Julien Bobroff,
professeur de physique à l'université Paris-Saclay

quelque chose les relie, une interaction locale inconnue ou un paramètre caché. « *Ce qui est décoiffant, c'est que l'intrication est conservée quand on éloigne les objets à grande distance, même à plus de mille kilomètres !* », poursuit le physicien. Si l'on observe nos deux dés intriqués, l'un à Paris et l'autre à Oslo, toute mesure d'un 2 sur le premier sera accompagnée de l'observation d'un 4 sur le second, et réciproquement. Tout se passe comme si l'état du dé était transmis instantanément à l'autre au moment de la mesure, donc à une vitesse supérieure à celle de la lumière… « *Cette action est immédiate et ne diminue pas avec la distance comme le font les autres interactions, par exemple la gravitation. Avouez que c'est difficile à concevoir !* » Si difficile qu'Albert Einstein lui-même n'y est jamais parvenu… Il considérait même l'intrication comme « *une action à distance qui fait froid dans le dos* ». Depuis, on sait manipuler des photons séparés de 1 400 kilomètres, et même enchevêtrer des atomes.

Mais saurait-on le faire avec des objets macroscopiques, voire… vivants ? En décembre 2021, une équipe basée à Singapour a affirmé avoir réussi cet exploit avec un tardigrade, un petit animal à toute épreuve : en situation extrême, notamment de froid ou de vide d'air, son métabolisme est interrompu ; il peut rester ainsi des



SETH WENIG/AP/SIPA

Puce de l'ordinateur d'IBM de 2018, comportant 7 qubits.

L'ordinateur, générateur… d'erreurs

Dans les puces électroniques, le bit d'information peut prendre la valeur 0 ou 1. Son équivalent quantique, le qubit, pourra représenter ces deux nombres, mais aussi tous ceux qui sont compris entre 0 et 1, ainsi que le 0 et le 1 en même temps ! En contrôlant parfaitement une centaine de qubits, isolés du monde extérieur, on obtiendrait en théorie une puissance infiniment supérieure à celle de nos supercalculateurs. *« Dans la pratique, les puces quantiques font beaucoup d'erreurs, environ une par millier d'opérations, résume Julien Bobroff. On doit donc déployer des méthodes pour les corriger. Si bien qu'il faudra probablement générer des millions de qubits pour produire un calcul utile à quelque chose. Or le record, aujourd'hui, c'est 127 qubits ! »* Ce nombre augmente lentement, car le taux d'erreurs s'envole avec le nombre de qubits. C'est un peu le serpent qui se mord la queue… On verra sans doute d'abord des ordinateurs quantiques analogiques, conçus pour résoudre un problème particulier, ce qu'on appelle un simulateur. Ils pourraient par exemple étudier l'évolution d'un système quantique complexe, ce qu'on ne sait pas faire aujourd'hui.

« C'est plus facile à construire qu'un ordinateur généraliste, puisqu'il suffirait de créer un système quantique reproduisant l'état de départ de ce que l'on veut étudier, puis de le laisser évoluer de manière spontanée. Un peu comme si, pour étudier la chute d'un gros rocher d'une montagne, on construisait une montagne à l'échelle Playmobil avant de faire dégringoler une bille. » **Ces simulateurs commencent à produire des résultats. On ne peut pas en dire de même pour les ordinateurs quantiques. Mais vu les efforts des géants de l'informatique, à commencer par IBM, Google ou Intel, il est permis d'espérer.**

décennies avant de revivre dès que les conditions s'y prêtent… Dans une enceinte sous vide refroidie à -273,14 °C – un centième de degré au-dessus du zéro absolu –, les chercheurs ont intriqué deux circuits quantiques. Ils ont déposé l'animal entre les deux: les propriétés électriques du système ont été légèrement modifiées. Les chercheurs en ont déduit que le tardigrade avait été intriqué. La nouvelle a fait le buzz… sans convaincre. « *Pour les spécialistes, n'importe quel matériau isolant produirait le même résultat, sans lien avec le fait qu'il s'agisse d'un animal,* justifie Julien Bobroff. *De plus, au moment de l'expérience, le tardigrade n'est plus vivant. La seule chose incroyable, c'est qu'il ait pu ensuite revenir à la vie… Mais c'est de la biologie, pas de la physique quantique!* »

On sait utiliser la téléportation pour transmettre des codes secrets

Maintenant que l'intrication n'a plus de secret pour nous, revenons plus en détail sur la téléportation quantique. « *Rien à voir avec* Star Trek, prévient Julien Bobroff. *Le terme est mal choisi, car il laisse penser qu'on a déplacé quelque chose de tangible. Or c'est seulement l'état d'une particule qui est transmis instantanément, et non celle-ci. On devrait plutôt parler de photocopie ou de télécopie d'état quantique.* » C'est déjà ébouriffant! Invoquons deux personnes, Alice et Bob, qui disposent chacun de l'un de deux photons préalablement intriqués, qu'on appelle A et B. Alice intrique son photon A avec un autre photon X. Quand Alice mesurera A, elle connaîtra donc l'état de X. Quelle que soit sa distance, la mesure du photon B par Bob donnera le même état que X: en intriquant ce troisième photon, Alice a donc « faxé » instantanément ses propriétés! Un mécanisme qu'on sait maîtriser aujourd'hui pour transmettre des informations à distance, par exemple des codes secrets. C'est ce qu'on appelle la distribution quantique de clés, qui offre de plus la garantie que cette communication restera secrète: comme on ne peut ni cloner l'état d'un photon, ni l'observer sans le modifier, tout espionnage serait immédiatement détecté. La Chine possède déjà un réseau de plusieurs milliers de kilomètres de fibres optiques qui est ainsi sécurisé. Ses ingénieurs savent aussi distribuer des clés à l'air libre, par satellite.

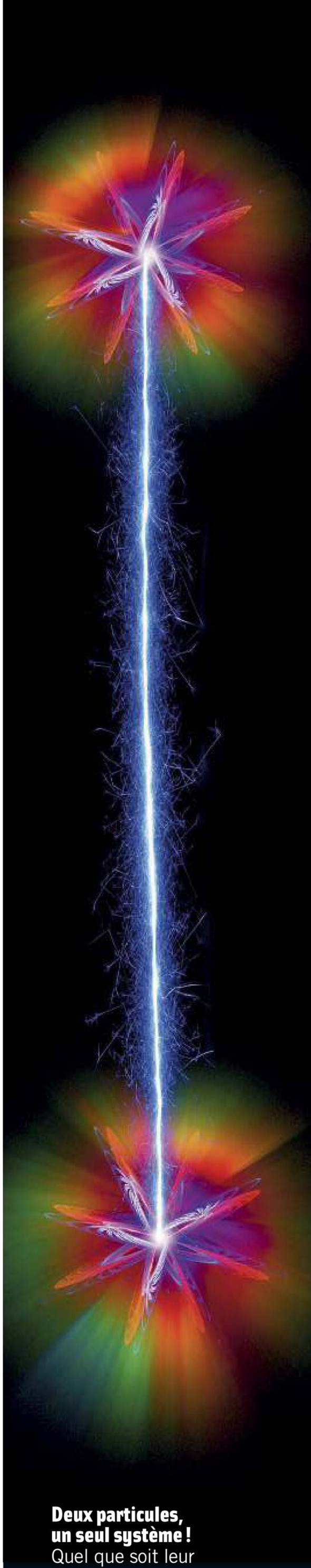
Si la plupart des effets quantiques ne s'observent qu'à une échelle microscopique, ils ont parfois des conséquences visibles. La preuve par l'eau… En principe, plus un matériau est froid et plus les éléments – atomes ou molécules – qui le composent sont rapprochés: une substance solide est donc plus dense que la même à l'état liquide. Ainsi, quand on jette une bille d'acier dans un creuset d'acier en fusion, elle coule. Et pourtant, la glace flotte au-dessus de l'eau… et c'est tant mieux: si elle était plus dense que le liquide, les lacs et les océans polaires seraient pris dans la masse à chaque hiver, tuant toute vie animale. Il s'agit là encore d'une bizarrerie, une conséquence des propriétés quantiques spécifiques des atomes d'oxygène et d'hydrogène qui composent l'eau: en dessous de 4 °C, comme les molécules sont moins agitées, elles peuvent échanger des électrons entre elles. Leur géométrie s'organise alors d'une manière qui les éloigne les unes des autres… et diminue la densité de l'eau et à fortiori de la glace.

Toutes ces propriétés un peu folles ont donné des idées aux scientifiques. Alors que certains effets quantiques risquent de stopper la course à la miniaturisation des composants électroniques, notamment « l'effet tunnel », qui permet – encore une propriété stupéfiante – aux électrons de traverser des murs, pourquoi ne pas s'appuyer sur cette drôle de physique pour réinventer l'ordinateur et atteindre des capacités de calcul inimaginables? L'idée fait son chemin *(lire l'encadré p. 22)*, mais la partie est loin d'être jouée.

En attendant, savourons l'existence de nos smartphones, de nos capteurs solaires, et continuons à utiliser nos IRM pour mieux être soignés. Tous ces appareils sont animés à notre insu par des phénomènes quantiques qui gouvernent le comportement des électrons dans les puces, créent du courant à partir de lumière ou permettent de visualiser la matière dans ses moindres détails… Sans les quanta, rien n'existerait de tout cela! **DENIS DELBECQ**

Julien Bobroff, *Le Quantique autrement,* Flammarion, 2020
Mon grand mécano quantique, illustrations de Marine Joumard, Flammarion, 2019

Une vidéo sur l'intrication quantique :
https://sciav.fr/intrication



Deux particules, un seul système! Quel que soit leur éloignement, ces deux particules intriquées dépendent l'une de l'autre : agir sur l'une, c'est agir sur l'autre. Vue d'artiste.

GETTY IMAGES

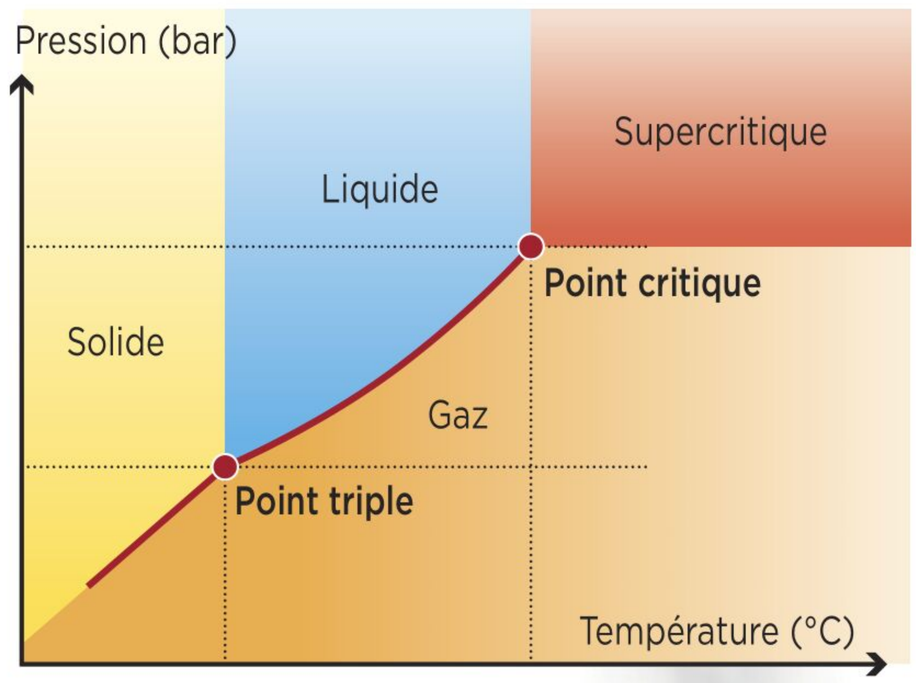
FLUIDES SUPERCRITIQUES

Liquides et gazeux… en même temps

Dans cet état entre liquide et gaz, les corps acquièrent des propriétés surprenantes, très utilisées dans l'industrie chimique pour remplacer les solvants organiques nocifs.

Boire un café décaféiné, se délecter d'un parfum, déguster un vin sans goût de bouchon… Ces moments de plaisir n'existeraient pas sans les surprenants fluides dits « supercritiques ». Pour comprendre ce qu'est l'état supercritique de la matière, le plus simple est d'observer le diagramme de phase d'une substance chimique pure, qui décrit l'état de celle-ci – liquide, solide ou gazeux – en fonction de la température et de la pression ambiantes *(voir le diagramme ci-contre)*. En faisant augmenter ces deux paramètres, on atteint un « point critique » au-delà duquel la frontière entre liquide et gaz finit par s'effacer. *« On dit alors du corps qu'il est supercritique. Il présente à la fois les propriétés d'un liquide et celles d'un gaz »*, explique Stéphane Sarrade, chercheur en génie des procédés et directeur des programmes Énergie au CEA. Dense comme un liquide, mais faiblement visqueux, il s'écoule aisément et peut aussi diffuser comme un gaz, dans un milieu poreux par exemple. Une aubaine pour l'industrie chimique, qui l'utilise dans de nombreuses applications.

La plus ancienne est celle du CO_2 supercritique, dont le point critique, à 31°C et 73 bars de pression, peut être aisément atteint. *« Le CO_2 supercritique a intéressé très tôt les chimistes, car il a un pouvoir solvant : à partir d'un mélange de molécules, il permet d'isoler celle qui nous intéresse. C'est notamment le cas de la caféine du café »*, souligne Stéphane Sarrade. Jusqu'aux années 1970, la production de café décaféiné s'effectuait à l'aide de solvants organiques tels que le trichloréthylène ou le chloroforme. Problème : leurs résidus sont toxiques pour l'organisme. Les industriels se sont alors tournés vers le CO_2 supercritique. Depuis une vingtaine d'années, il est également employé pour extraire une molécule présente dans le liège, le trichloroanisole, responsable du désagréable goût de bouchon de certains vins. *« En jouant sur la température et la pression, et en rajoutant un peu d'eau ou d'éthanol, on peut piloter le pouvoir solvant du CO_2 supercritique, donc sa densité, afin d'extraire une molécule*

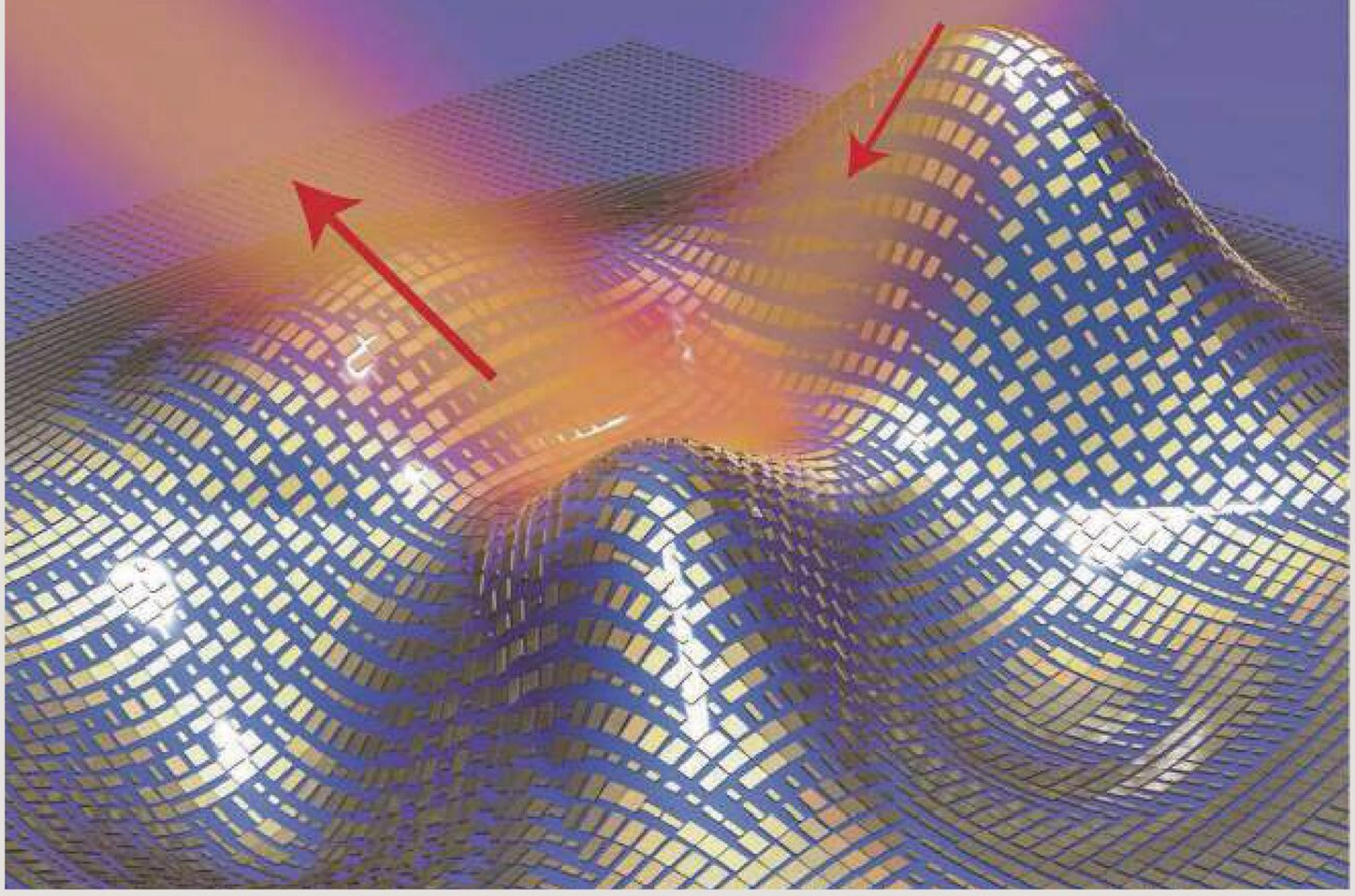


BRUNO BOURGEOIS

Diagramme de phase d'une substance chimique pure, qui décrit l'état de celle-ci – liquide, solide, gazeux ou… les deux – en fonction de la température et de la pression ambiantes.

GETTY IMAGES

donnée. C'est ainsi qu'on obtient nombre de principes actifs de plantes en parfumerie et que, plus largement, on fait de la "chimie verte" sans solvants organiques », détaille le chercheur. Le CO_2 supercritique ne sert pas seulement à extraire : on peut aussi y solubiliser des molécules pour imprégner du bois afin de renforcer sa structure, ou encore l'utiliser pour teindre des vêtements. De la même manière, l'eau peut, elle aussi, être portée à l'état supercritique : elle permet par exemple de rendre soluble le polyéthylène des bouteilles plastique afin de les recycler ; ou encore de traiter des déchets radioactifs liquides en les compactant sous forme minérale. On la trouve même… à l'état naturel. Son point critique de 374°C et 220 bars est en effet atteint au fond des océans, à plusieurs milliers de mètres de profondeur, là où des cheminées volcaniques portent l'eau à haute température. Ces «fumeurs noirs» – ainsi baptisés car les effluents sont assombris par des minéraux dissous – intéressent beaucoup les biologistes. En 2002, une équipe de chercheurs japonais soumet en laboratoire une solution de glycine, un acide aminé, à de l'eau supercritique. Et constate que la glycine s'est assemblée en deux ou trois exemplaires. Or, l'assemblage des acides aminés est la première étape dans la synthèse des protéines, phénomène fondamental du vivant... L'eau supercritique pourrait donc avoir joué un rôle de solvant aux origines de la vie. **JEAN-FRANÇOIS HAÏT**



BERKELEY LAB

Couverte de nano-antennes d'or qui courbent la lumière en la réfléchissant, cette «cape d'invisibilité» ultrafine, réalisée par des chercheurs américains, peut masquer de petits objets.

INVISIBILITÉ

Métamatériaux, les secrets de l'invisibilité

Qui n'a jamais rêvé d'emprunter la cape d'invisibilité de Harry Potter ? De rendre les avions furtifs ou de faire glisser vagues et ondes sismiques sur les immeubles comme si elles n'étaient que vent ? Bref, de défier la propagation des ondes ! Une idée qui commence à se concrétiser depuis 2006, quand le physicien américain David Smith, aidé du théoricien britannique John Pendry, réalise la première cape fonctionnelle : un assemblage d'anneaux concentriques portant des composants électroniques capables d'absorber ou de réémettre les micro-ondes d'une fréquence de radar. Placez un objet métallique sur une table et éclairez-le avec le radar. Ses ondes rebondissent sur l'objet, et le radar le voit. Maintenant, entourez l'objet avec la cape. Le radar ne voit plus rien : tout se passe comme si l'objet n'était pas là !
La cape est un métamatériau : un agencement composite aux propriétés savamment calculées pour manipuler l'indice de réfraction des ondes. Pour la lumière, cet indice est le rapport entre la vitesse de l'onde dans le vide et dans un matériau. Dans cette expérience, l'onde pénètre dans l'anneau extérieur de la cape, change de direction et reprend sa course en ligne droite après avoir dévié selon un petit angle. Puis elle pénètre dans l'anneau suivant, tourne à nouveau, et ainsi de suite. À force d'être réfractée, l'onde évite le centre de la cape et ressort à l'arrière. Aucune onde ne revient donc vers le radar.
Depuis cette première, chacun y va de son matériau. C'est ainsi qu'on imprime en 3D des anneaux de plastique qui absorbent plus de 90 % du son qu'ils reçoivent sans empêcher l'air de passer. Aux bonnes dimensions, c'en serait fini du vacarme des réacteurs d'avions !
À y regarder de près, tout, d'ailleurs, peut être transformé en métamatériau, même un banal terrain boueux. Sébastien Guenneau (institut Fresnel de Marseille) et Stéphane Brûlé (groupe Ménard) ont ainsi creusé 23 trous cylindriques profonds de 5 mètres sur 2 mètres de diamètre, alignés tous les 10 mètres. Puis ils ont simulé des micro-séismes de surface : les capteurs placés entre les trous n'ont pratiquement rien perçu ! Les ondes ont été réfléchies par ce sol structuré, mais ne l'ont pas traversé. Une piste sérieuse pour doper la résistance des constructions aux séismes. D'autres travaux ont montré que des piliers plongés dans l'eau ont la capacité de repousser les vagues, voire d'absorber leur énergie. De quoi transformer la houle en électricité ?
« Nous y travaillons », répond sobrement Sébastien Guenneau.
Le défi majeur est d'élaborer des métamatériaux efficaces dans une large gamme de fréquences, en particulier pour les ondes électromagnétiques dont le spectre est immense. La cape de Harry Potter n'est pas pour demain…
Mais un autre matériau pourrait bien nous surprendre : le groupe de Corentin Coulais (université d'Amsterdam) travaille sur le « métachocolat » idéal, qui démultiplierait nos sensations gustatives au moment de croquer ! **DENIS DELBECQ**

Curiosités mathématiques

Le monde visible regorge de manifestations incroyables… Mais celui, abstrait, des mathématiques n'a rien à lui envier ! La preuve en trois curiosités qui défient la logique.

Ils voient des « 1 » partout

La mission InSight de la Nasa étudie les tremblements « de terre » de la planète Mars. Mais l'analyse de ses résultats est rendue délicate par la faible amplitude des ondes sismiques qui s'y propagent. Pour mieux appréhender l'activité sismique non détectée, les géologues ont eu recours à un résultat empirique : la loi des nombres anormaux, également appelée loi du premier chiffre significatif ou loi de Benford. Cette observation, formulée dès 1881 par l'astronome canadien Simon Newcomb, a été redécouverte cinquante-sept ans plus tard par Frank Benford, ingénieur à la General Electric. Elle stipule que pour de nombreuses données empiriques, il y a significativement plus de nombres commençant par un 1 que de nombres commençant par un 2, ces derniers étant eux-mêmes plus nombreux que les nombres commençant par un 3 et ainsi de suite. Le mathématicien Persi Diaconis a même pu déterminer en 1977 que, sous certaines hypothèses, la proportion théorique de données démarrant par un 1 est exactement $\log(3/2)$ et, plus généralement, que la proportion de données démarrant par le chiffre k (entre 1 et 9) est $\log((k+1)/k)$.

On peut observer cette répartition dans de nombreuses activités humaines – des prix dans les rayons de votre supermarché jusqu'aux résultats d'un candidat dans différents bureaux de vote –, mais aussi dans des activités naturelles, telles les fréquences des tremblements de Terre. C'est en supposant que les tremblements de Mars suivaient eux aussi cette « loi » que les sismologues d'Insight ont pu réaliser que leurs mesures étaient incomplètes, et localiser dans quelles fréquences chercher les signaux manquants… avec succès. **ROGER MANSUY**

Et l'un devient deux

WIKIPEDIA

Prenez une boule et découpez-la en petits morceaux. Tel un puzzle, reconstituez l'ensemble – cela ne semble pas hors de portée. Maintenant, avec les mêmes morceaux, tentez de former… deux boules identiques à l'objet de départ. Impossible ? Pas pour les mathématiciens, qui savent démontrer qu'une boule découpée d'une façon particulière peut en donner deux. Cela ne veut pas dire pour autant que 1 = 2. Et inutile d'espérer faire disparaître la faim dans le monde en découpant une tomate pour en créer autant que l'on veut… Cette situation paradoxale résulte d'un jeu avec l'infini baptisé « paradoxe de Banach-Tarski », du nom des mathématiciens polonais Stefán Banach (1892-1945) et Alfred Tarski (1901-1983) qui l'ont démontré en 1924.

Ce résultat n'est paradoxal que dans le monde physique, qui n'est ni continu, ni découpable à l'infini, contrairement à l'espace abstrait des mathématiques (euclidien à trois dimensions). Tout réside dans ce mot d'infini, que les mathématiciens définissent comme quelque chose qui est identique à lui-même. Ce qui conduit au paradoxe bien connu de l'hôtel de Hilbert : un hôtel possédant une infinité de chambres toutes occupées peut cependant toujours accueillir une infinité de nouveaux hôtes : il suffit de dire à chacun des occupants de se décaler d'une chambre.

La démonstration du paradoxe de Banach-Tarski se fonde également sur « l'axiome du choix », qui affirme la possibilité de construire des ensembles en répétant une infinité de fois une action de choix. Un axiome dont la plausibilité fait parfois débat. Pourtant, même en s'en passant, d'autres situations dérangent l'intuition : on peut ainsi déterminer à l'intérieur d'une boule quasiment aussi grosse que l'on veut – une étoile, disons – des ensembles que l'on peut réarranger de manière à ce qu'ils tiennent dans une boule de la taille d'un grain de sable (paradoxe de Dougherty-Forman)… Les mathématiques ne sont pas avares de paradoxes. **PHILIPPE PAJOT**

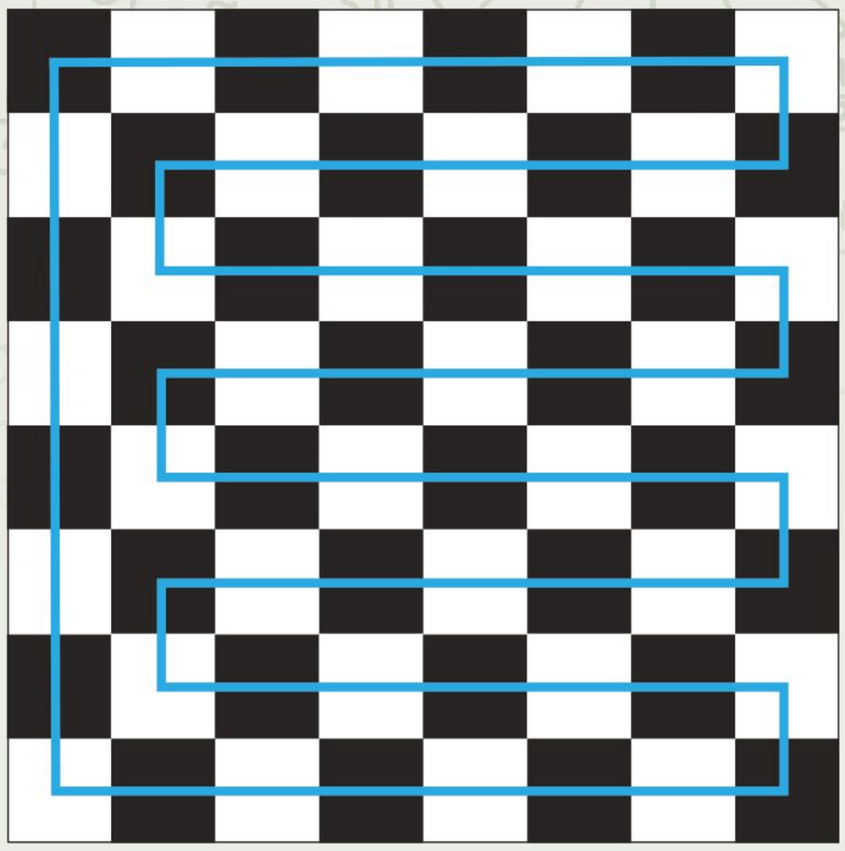
À partir d'une boule découpée subtilement, on peut en reconstituer deux identiques à la première… mais seulement dans l'espace abstrait des mathématiques !

L'échiquier mutilé

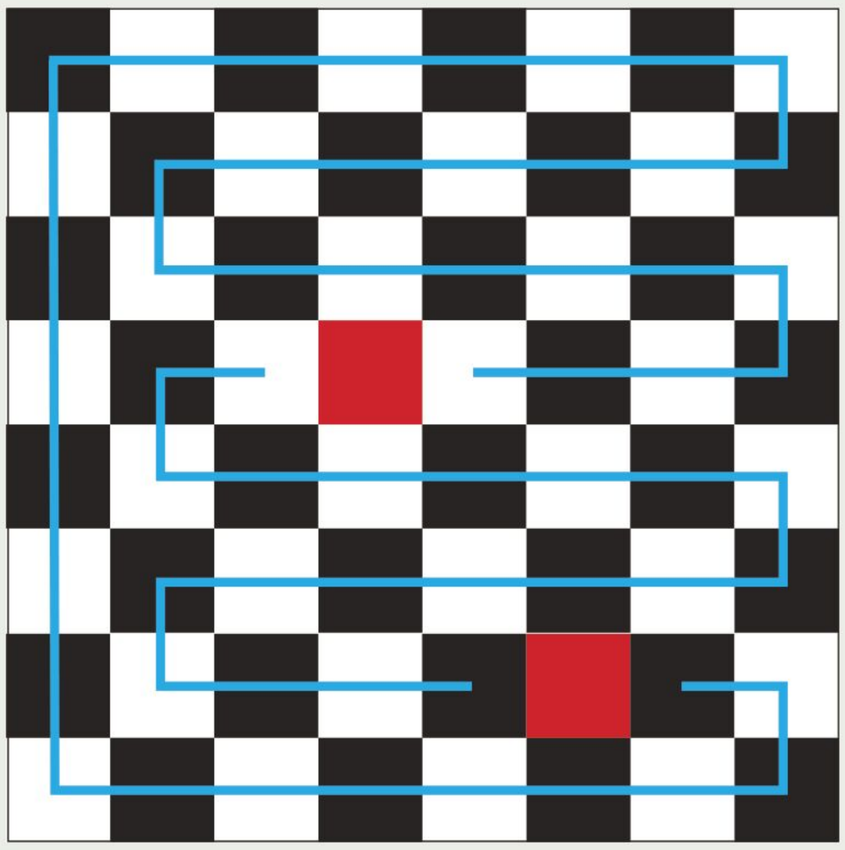
L'énigme dite de «l'échiquier mutilé» présente un joli défi pour le raisonnement mathématique. On dispose d'un damier de 8 cases sur 8, amputé de deux coins situés aux extrémités d'une diagonale, et de 31 dominos qui permettent chacun de couvrir exactement deux cases de l'échiquier. On demande de recouvrir les 62 cases restantes avec ces 31 dominos… Cela ne semble pas bien difficile et pourtant… il s'avère que c'est impossible ! Mieux encore, il existe une élégante preuve de ce résultat, à la fois élémentaire et astucieuse. Dans un premier temps, on remarque que chaque domino disposé sur l'échiquier recouvre deux cases contiguës, donc nécessairement deux cases de couleurs différentes : un pavage de l'échiquier mutilé couvrirait donc autant de cases blanches que de cases noires. Dans un second temps, on vérifie que les deux cases enlevées sont de la même couleur : il ne reste donc sur l'échiquier mutilé que 30 cases blanches et 32 noires, ou l'inverse. En rassemblant les deux affirmations, on aboutit à une contradiction ! Il est impossible de paver l'échiquier tronqué avec les dominos. La forme de la zone à couvrir ne joue aucun rôle dans cet argument ; on peut donc procéder de même pour tout échiquier privé de deux cases de la même couleur, quelles que soient leurs positions. Une question naturelle consiste alors à se demander ce qui se passe lorsqu'on enlève deux cases de couleurs distinctes. Réponse curieuse : il est possible, toujours, de recouvrir l'échiquier… quelle que soit la position des cases enlevées. La preuve s'avère un tantinet plus technique. Pour cela, commençons par tracer sur l'échiquier, à ce moment encore intact, un circuit fermé passant une – et une seule – fois par toutes les cases ❶ : il y a de multiples façons de procéder et toutes conviennent pour la suite (même si elles ne n'aboutissent pas forcément au même pavage avec les dominos). Lorsque l'on ampute le plateau de deux cases de couleurs différentes, le circuit choisi se trouve découpé en deux chemins reliant les cases enlevées et ne se croisant pas ❷ : chacun de ces chemins passe par un nombre pair de cases (cela découle directement du fait que les deux cases enlevées sont de couleurs différentes et que, le long du circuit, on alterne case noire et case blanche). On peut maintenant construire un pavage du damier mutilé avec les dominos ❸ : il suffit pour cela de poser les dominos en partant d'une case enlevée et en suivant chacun des chemins ; si le chemin commence par deux cases sur la même ligne, respectivement sur la même colonne, on pose un domino horizontalement, respectivement verticalement ; on prend ensuite les deux cases suivantes parcourues par le chemin… et ainsi de suite. Étonnant, non ?

R. M.

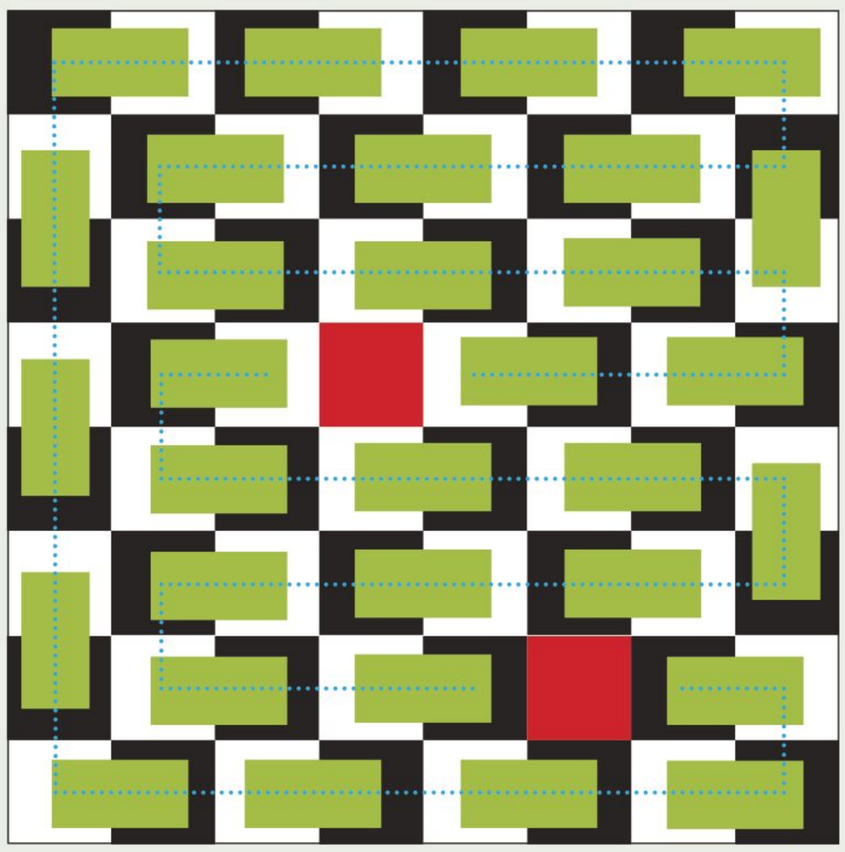
SHUTTERSTOCK



❶ **On trace un circuit passant par toutes les cases.**



❷ **On enlève deux cases de couleurs différentes.**



❸ **Après avoir recouvert les chemins par des dominos (en vert), toutes les cases sont couvertes !**

ANTIMATIÈRE

« Une particule de matière, sur un milliard, a réussi à survivre. Pourquoi ? »

Au commencement étaient la matière et sa jumelle antagoniste, l'antimatière. Alors qu'elles auraient dû s'annihiler, la première a résisté… Un défi au modèle standard de la physique.

YASMINE AMHIS.2022

YASMINE AMHIS

Chargée de recherche au Laboratoire des deux infinis Irène Joliot-Curie à Orsay.

Qu'est-ce que l'antimatière ?

Selon le modèle standard de la physique des particules qui décrit les composants de la matière et leurs interactions fondamentales, tout élément de la matière ordinaire possède un double, de même masse et même durée de vie mais de charge opposée. À l'électron, par exemple, de charge négative, est associé le positon. C'est la même chose pour les quarks dont l'assemblage forme les neutrons et les protons. Il y a ainsi des antiquarks à l'intérieur des antineutrons ou des antiprotons, qui forment des anti-atomes. En 1926, le Britannique Paul Dirac a déduit leur existence à partir d'équations, et l'Américain Carl Anderson a observé les premiers positons en 1932.

Comment cette antimatière se forme-t-elle ?

Beaucoup l'a été au cours des premières fractions de seconde qui ont suivi le Big Bang, quand des paires particule-antiparticule ne cessaient d'apparaître. Actuellement, il y a d'autres sources, car certains éléments radioactifs se transforment en émettant des positons. C'est ce principe qui est utilisé à l'hôpital lorsqu'on recherche des cellules cancéreuses grâce à la tomographie par émission de positons (TEP). Nous suspectons les pulsars – ces étoiles à neutrons en rotation rapide – d'émettre des positons. Mais nous en fabriquons aussi au LHC, le grand accélérateur de particules du Cern à Genève, afin de les étudier.

Il devrait donc y en avoir partout. Or il n'y en a nulle part… Comment l'expliquer ?

C'est la grande énigme de la physique contemporaine ! Dans les premières phases du Big Bang, dès que la matière et l'antimatière entraient en contact, elles s'annihilaient mutuellement et se transformaient en lumière pure. Si la matière et l'antimatière ont été créées et détruites ensemble, l'Univers ne devrait contenir que de l'énergie résiduelle… et nous n'existerions pas. Or nous existons ! Une minuscule partie de la matière – environ une particule sur un milliard – a réussi à survivre. Pourquoi ? C'est tout le sujet de cette quête.

Quelles sont les pistes de recherche ?

L'idée la plus répandue est qu'il doit y avoir entre ces deux sortes de matière des différences que le modèle standard ne prévoit pas et qui auraient permis à la matière de prédominer sur l'antimatière. Dans un article paru dans *Nature* en mars dernier, la collaboration Asacusa, qui étudie, au Cern, les atomes d'hélium hybrides où un antiproton remplace un des deux électrons, a ainsi observé des réponses optiques inattendues quand ces atomes étaient plongés dans un bain d'hélium superfluide. Et avec notre collaboration LHCb, nous tentons de comprendre les propriétés de l'antimatière avec des quarks et des antiquarks de différentes caractéristiques. Nous avons déjà observé des différences significatives entre des mésons b (particules formées de deux quarks de types différents) et des antimésons b. Une nouvelle physique est peut-être en train d'émerger.

PROPOS RECUEILLIS PAR JACQUES-OLIVIER BARUCH

9 EXPÉRIENCES INTRIGANTES à faire chez soi

Textes : Tania Louis. Son site : tanialouis.fr
Dessins : Serge Bloch. Son site : sergebloch.com

Voir son ADN à l'œil nu, éveiller des dragons, faire geler de l'eau en un tournemain... Des expériences qui paraissent difficilement faisables dans son salon ! Pourtant, il suffit d'objets du quotidien tels qu'un verre d'eau, quelques ballons ou du bicarbonate de soude pour les réaliser. Voici neuf occasions de faire des prodiges !

❶ La canette bancale
Ou comment faire tenir une canette dans un équilibre improbable

❷ La surfusion
Ou comment changer (presque) instantanément l'eau en glace

❸ Les ballons increvables
Ou comment tester les limites de la résistance des ballons de baudruche

❹ Le canon de Galilée
Ou comment projeter une balle sans effort

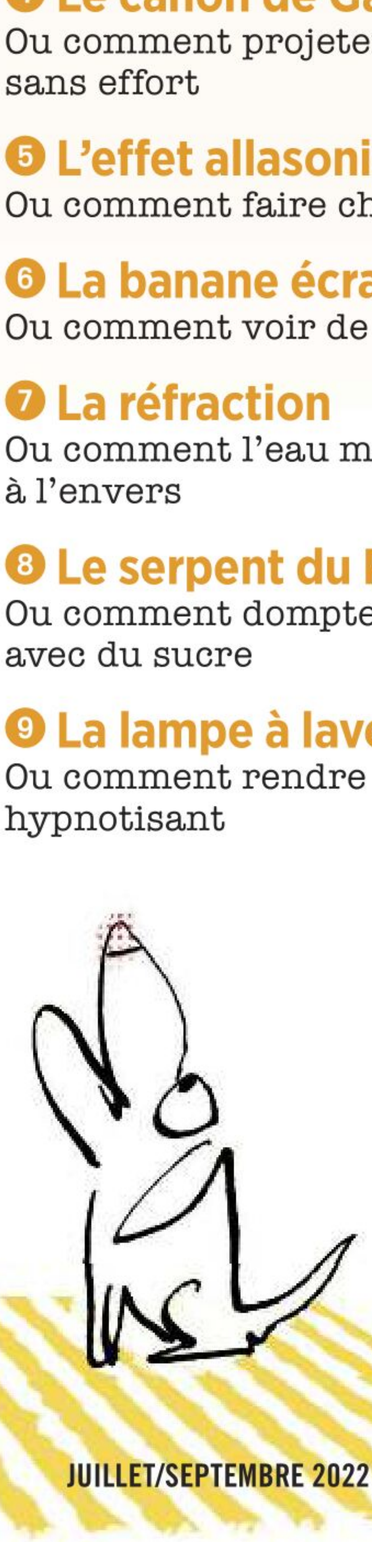
❺ L'effet allasonique
Ou comment faire chanter son café

❻ La banane écrasée
Ou comment voir de l'ADN à l'œil nu

❼ La réfraction
Ou comment l'eau met le monde à l'envers

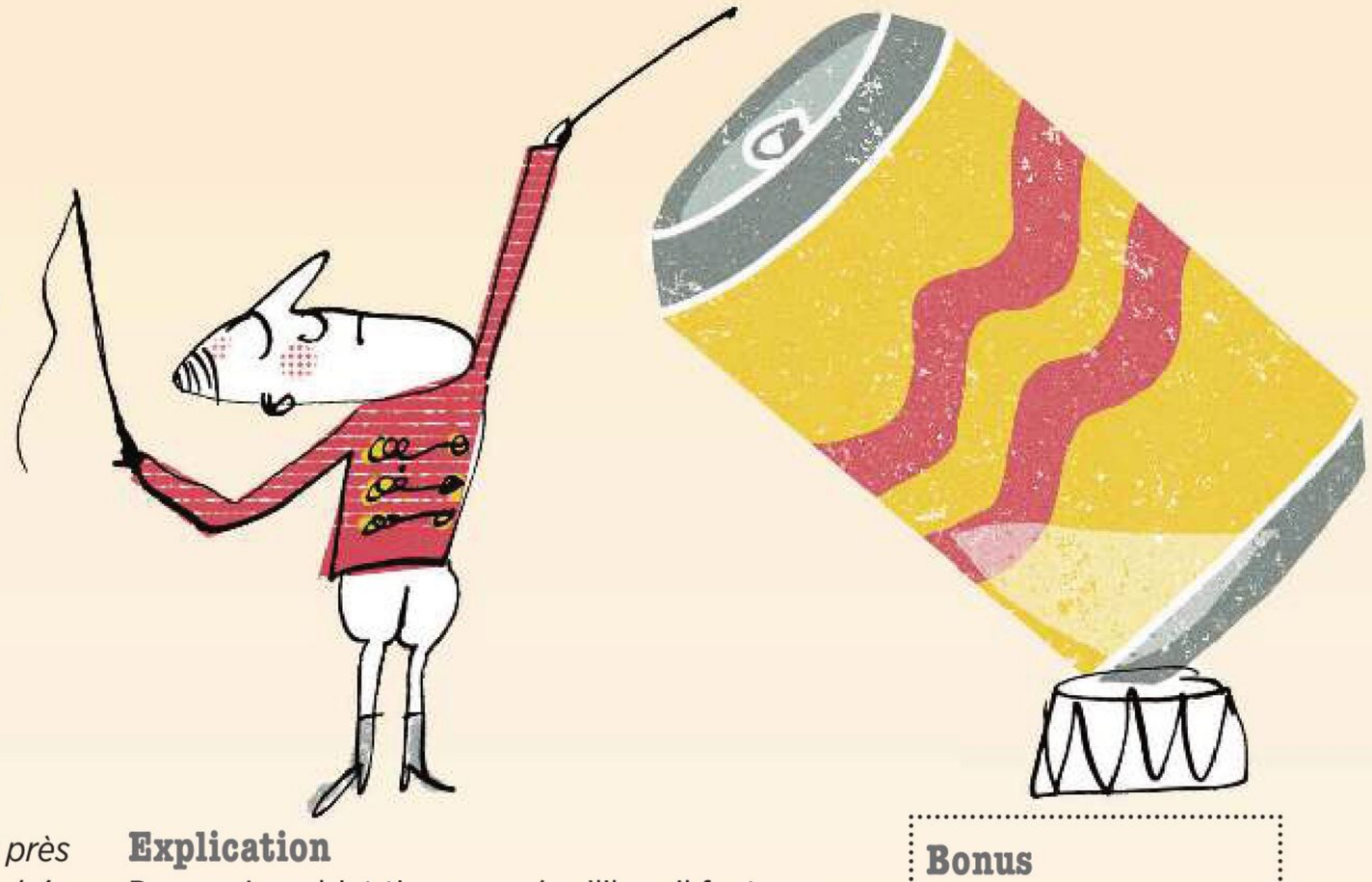
❽ Le serpent du Pharaon
Ou comment dompter un reptile avec du sucre

❾ La lampe à lave maison
Ou comment rendre le vinaigre hypnotisant



❶ La canette bancale

Ou comment faire tenir une canette dans un équilibre improbable



Matériel nécessaire
- Une canette vide
- Un peu d'eau

Durée : 5 minutes
Difficulté : facile

Certaines boissons sont vendues dans des canettes en aluminium qui ont toujours à peu près la même forme cylindrique. Leur fond est bombé vers l'intérieur et elles reposent de façon très stable sur un rebord circulaire. Rien de surprenant jusque-là. Et pourtant…

Description
Si vous inclinez une canette et que vous essayez de la faire tenir en équilibre sur son rebord inférieur une fois penchée, vous risquez de vous arracher les cheveux. Mais ce n'est pas impossible ! Il suffit de verser un peu d'eau dans une canette vide : environ 50 ml, c'est-à-dire une petite tasse à café, pour une canette de 33 cl. Reste à trouver le bon angle d'inclinaison, et l'on peut lâcher la canette : elle tient penchée très facilement.

Explication
Pour qu'un objet tienne en équilibre, il faut que son centre de gravité soit aligné verticalement avec son point d'appui. Si une canette est entièrement vide ou pleine, son centre de gravité se trouve au milieu du cylindre. Il reste à cet endroit quand la canette est penchée et se retrouve donc décalé sur le côté au lieu d'être à la verticale du point d'appui : la canette tombe.
Mais si la canette contient un peu de liquide, celui-ci se répartit de part et d'autre du point d'appui quand on la penche. En en ajustant correctement la quantité, on peut ainsi compenser le poids de la canette elle-même et garder le centre de gravité de l'ensemble à la verticale du point d'appui : cette fois, ça tient !

Bonus
Sodas, jus de fruits ou bières, on trouve beaucoup de boissons différentes en canettes, ce qui fait de cette expérience un super défi d'apéro en famille. Attention quand même : cela ne marche pas toujours du premier coup. Gardez une éponge à portée de main !

sciav.fr/canette

❷ La surfusion

Ou comment changer (presque) instantanément l'eau en glace

Matériel nécessaire
- Une bouteille d'eau minérale
- Un congélateur

Durée : 3 heures
Difficulté : facile

On a l'habitude de voir de l'eau liquide ou, avec le retour des beaux jours, sous forme de glaçons. Mais ce n'est pas si fréquent d'observer son passage de l'état liquide à l'état solide. Encore moins quand ce changement est quasi instantané ! Et pourtant…

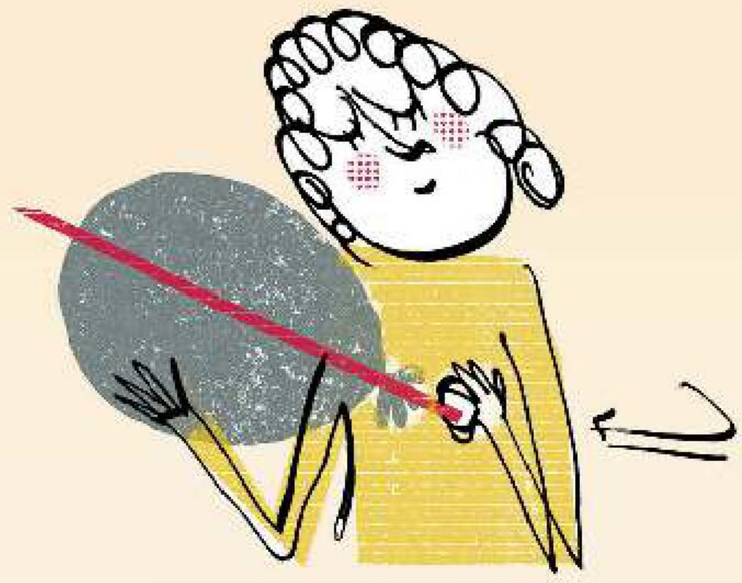
Description
Mettez la bouteille d'eau minérale au congélateur pendant 2 h 30 à 3 heures puis récupérez-la en la manipulant tout doucement : l'eau qu'elle contient devrait encore être liquide. Donnez une pichenette à la bouteille ou tapez-la d'un coup sec sur un support. Surprise ! Elle va geler sous vos yeux.

Explication
L'eau est censée se solidifier quand elle est refroidie à moins de 0 °C. Mais les températures de nos congélateurs ne suffisent pas forcément à déclencher ce phénomène : il faut une autre perturbation, comme un choc, des vibrations (si l'on attend assez longtemps, celles du congélateur suffisent) ou une impureté pour que les premiers cristaux de glace se forment. En dessous de 0 °C, l'eau encore liquide se trouve dans un état dit de surfusion : elle est prête à se solidifier si on lui fournit le bon déclencheur.

sciav.fr/surfusion

sciav.fr/lasurfusion (anglais, sous-titré français)

Bonus
Si vous voulez tester autre chose qu'un choc, vous pouvez verser de l'eau surfondue sur des glaçons pour construire des stalagmites glacées, ou plonger le coin d'un glaçon dans un verre d'eau en surfusion pour la faire geler. L'eau en bouteille contient peu d'impuretés, ce qui lui permet de ne pas se transformer en glace trop facilement, mais l'expérience peut fonctionner avec de l'eau du robinet. À vous de tester !



❸ Les ballons increvables

Ou comment tester les limites de la résistance des ballons de baudruche

Matériel nécessaire

- Des ballons de baudruche
- Des pics à brochette
- Des clous ou des punaises
- Une planche ou du carton
- Une orange

Durée : 15 minutes
Difficulté : intermédiaire

Lorsqu'on gonfle un ballon de baudruche, le caoutchouc qui le compose se tend. Si bien que, quand on y perce un trou, la fissure se propage rapidement à l'ensemble du ballon, qui éclate. Il semble donc peu malin d'en approcher un pic à brochette. Et pourtant…

Description

Pour cette expérience, nous vous proposons trois façons différentes de maltraiter des ballons.

❶ Première possibilité : les transpercer avec des pics à brochette… sans les faire éclater ! Si vous collez un morceau de ruban adhésif à la surface d'un ballon et que vous plantez votre pic au milieu de cette zone renforcée, le ballon résistera. Idem si vous enfoncez doucement votre pic juste à côté du nœud du ballon et que vous le faites ressortir à l'opposé, dans la partie renforcée. Vous devriez obtenir une belle brochette ! Si le bois du pic accroche, trempez-le dans du liquide vaisselle ou de l'huile pour le lubrifier et éviter ainsi de déchirer le ballon.

❷ Le ballon a-t-il encore une chance si l'on utilise des objets plus pointus ? Étonnamment, oui. Plantez une quinzaine de clous à travers une fine planche ou transpercez un morceau de carton rigide avec autant de punaises, de façon que leurs pointes soient à seulement un ou deux centimètres les unes des autres. Posez votre ballon sur cette surface menaçante. Il faudra appuyer assez fort pour qu'il finisse par éclater : coincez-le donc avec un objet, comme une autre petite planche, au lieu de le tenir à la main. Vos doigts n'ont pas envie d'affronter à leur tour les piquants quand le ballon cédera.

❸ Mais les ballons ont aussi des fragilités inattendues : pour le vérifier, armez-vous d'une épluchure d'orange ! Pliez-la au-dessus d'un ballon. De petites gouttes de liquide, pas forcément visibles, vont en gicler et, si le ballon a été bien gonflé, il devrait éclater à leur contact.

Explication

La fragilité des ballons vient de la facilité avec laquelle les fissures se propagent dans le caoutchouc tendu. Dans l'expérience avec les pics à brochette, on bloque cette propagation avec du ruban adhésif, qui coince le caoutchouc, ou en passant à travers les zones où celui-ci est moins tendu et plus épais. Dans l'expérience avec les clous ou les punaises, on évite carrément la formation des fissures en répartissant la pression entre les pointes : plus il y en a, moins chacune d'elles force sur le caoutchouc. C'est le principe qui permet aux fakirs de s'allonger sur une planche à clous : pas de magie là-dedans, juste de la physique.
Et les épluchures d'orange, dans tout ça ? Celles-ci sont parsemées de petites poches remplies d'un liquide qui contient du limonène, une molécule qui donne leur odeur à certains agrumes. Or, la structure chimique du limonène est très proche de celle du caoutchouc des ballons ! Si bien que, lorsqu'un peu de limonène arrive à la surface d'un ballon tendu, cette molécule s'insère entre celles du caoutchouc et forme un petit trou, qui peut suffire à faire éclater le ballon.
Il faut avoir les bons fruits et des ballons bien gonflés, mais le match est sans appel : Orange 1 – Baudruche 0.

Orange
sciav.fr/orange

Pic à brochette
sciav.fr/picbrochette

Planche de clous
sciav.fr/plancheclous

❹ Le canon de Galilée

Ou comment projeter une balle sans effort

Matériel nécessaire
- Une grosse balle
- Une petite balle
- De la place en extérieur

Durée : 5 minutes
Difficulté : intermédiaire

Si vous tenez une balle, que vous tendez les bras devant vous à l'horizontale et que vous la lâchez, elle va rebondir moins haut que sa position initiale. En effet, une partie de l'énergie de la balle est perdue quand elle touche le sol et il lui en reste donc moins pour remonter. Ce qui est un peu décevant. Et pourtant…

Description
Vous n'aurez besoin que d'un seul objet pour faire prendre de la hauteur à votre balle récalcitrante : une seconde balle, plus grosse que la première. Empilez verticalement les deux balles en mettant la plus petite au-dessus de l'autre, tenez-les à bout de bras et lâchez-les en même temps. La grosse balle ne va quasiment pas rebondir, mais la petite va être projetée bien au-delà de la hauteur de départ !

Explication
Après avoir été lâchée, la grosse balle atteint le sol en premier, et elle est déjà en train de rebondir quand la petite lui tombe dessus. La grosse balle propulse donc la petite vers le haut, comme si on l'avait frappée avec une raquette. Elle lui transfère ce que les physiciens appellent une quantité de mouvement, qui dépend de la masse et de la vitesse d'un objet. La petite balle ayant une masse moins importante que la grosse, la quantité de mouvement qu'elle récupère se traduit par une augmentation importante de sa vitesse, ce qui lui permet de rebondir très haut.
Le résultat dépendra des balles que vous utilisez et de la dureté du sol sur lequel elles rebondissent, mais cela peut être assez spectaculaire avec une balle de tennis et un ballon de basket.

Bonus
Cela demande un peu d'adresse, mais sachez que l'expérience marche encore mieux en empilant davantage de balles, de la plus grande à la plus petite. Vous aimez les défis ? Le record du monde est à 9 mètres, avec cinq balles !

sciav.fr/ballesrebondissantes

En plus spectaculaire mais en anglais, sous-titré français : sciav.fr/balldrop

❺ L'effet allasonique

Ou comment faire chanter son café

Matériel nécessaire
- Une tasse
- Du café soluble
- De l'eau chaude
- Une cuillère

Durée : 5 minutes
Difficulté : facile

Imaginez un matin difficile, avec rien d'autre à boire que du café soluble. Ce réveil morose ne fait pas franchement envie. Et pourtant…

Description
Versez un peu de café soluble dans une tasse, complétez avec de l'eau chaude – cela marche aussi avec du chocolat en poudre et du lait –, mélangez un peu et tapez sur le bord de votre tasse avec votre cuillère. Plusieurs fois de suite. Faites taire la petite voix dans votre tête qui signale que cette pauvre tasse n'a rien fait pour mériter une telle maltraitance, et écoutez plutôt le bruit que fait votre cuillère : la note obtenue en frappant la tasse devient de plus en plus aiguë !

Explication
Ce phénomène physique porte le nom d'effet allasonique ou, de façon plus réconfortante, effet chocolat chaud. Il est dû aux bulles produites par le café soluble ou le chocolat en poudre. En effet, les sons sont des vibrations de la matière, qui se propagent dans le liquide contenu par notre tasse martyrisée et dans l'air, jusqu'à atteindre nos tympans. Or, la matière est plus tassée dans un liquide que dans un gaz. Lorsque le son engendré au début de l'expérience traverse les bulles contenues dans le mélange, il est ralenti par ces poches de gaz. Cela fait diminuer sa fréquence : la note produite est grave. Plus les bulles disparaissent, moins le son est ralenti dans la tasse, et plus la note obtenue devient aiguë. Voilà de quoi égayer vos matins difficiles !

sciav.fr/sonducafé

❻ La banane écrasée

Ou comment voir de l'ADN à l'œil nu

Matériel nécessaire

- Une banane
- Une assiette creuse
- Une fourchette
- Du sel
- Du liquide vaisselle
- Un tamis fin
- Un petit verre
- De l'alcool à 70 %

Durée : 15 minutes
Difficulté : intermédiaire

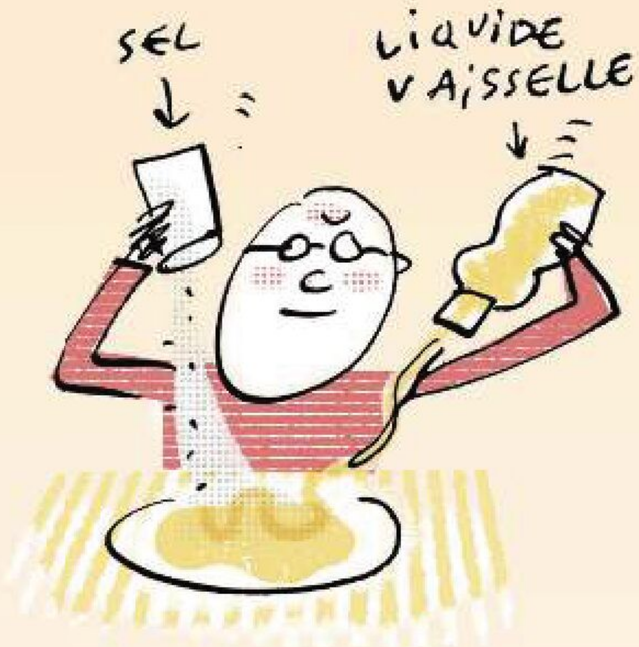
Banane, humain ou bactérie, un génome est niché dans la plupart des cellules des êtres vivants, sous la forme d'une ou plusieurs longues molécules d'ADN de seulement 0,000 002 millimètre de diamètre. Autant dire que, même un peu enroulé, il paraît difficile de voir cet ADN à l'œil nu. Et pourtant…

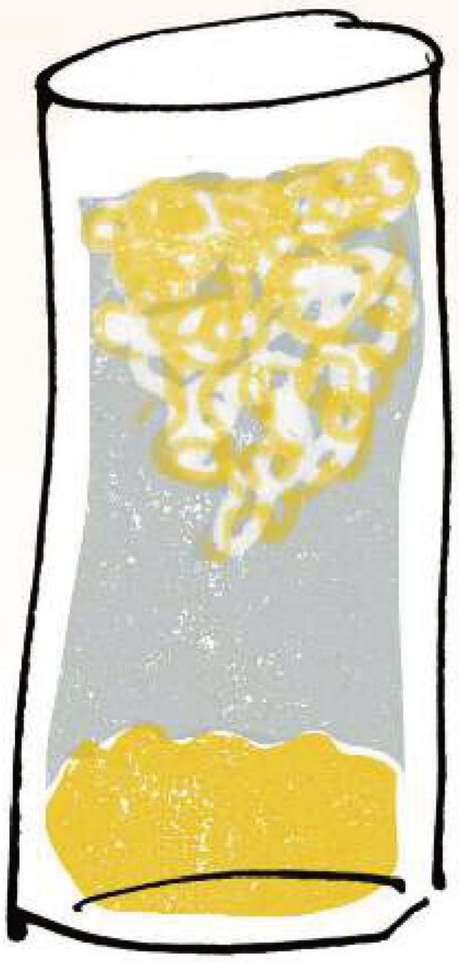
Description

❶ Dans une assiette creuse, écrabouillez un tiers de banane pour en faire de la purée. Ajoutez l'équivalent d'une cuillère de sel et mélangez. Puis complétez avec une bonne giclée de liquide vaisselle et continuez à mélanger, en évitant de faire des bulles. Ajoutez ensuite un peu d'eau, à peu près autant que la quantité de banane de départ, et homogénéisez le mélange, toujours sans faire de bulles.

❷ Passez ensuite votre bouillie à travers un tamis fin, comme un filtre à thé, pour ne récupérer que la partie liquide. Cela marche aussi en utilisant un filtre à café en papier, mais c'est plus long. Munissez-vous d'un récipient transparent et assez fin, comme un petit verre, et remplissez-en le tiers avec votre « extrait de banane ».

❸ Enfin, penchez ce récipient pour y verser doucement à peu près autant d'alcool que de jus. C'est l'étape la plus délicate : il faut que l'éthanol forme une couche transparente au-dessus du reste, sans se mélanger. Des filaments blancs vont spontanément passer de la partie banane à la partie alcool de votre récipient : ce sont des morceaux d'ADN ! En agitant un peu, ils finiront par se détacher et former une sorte de méduse flottant dans l'alcool, bien visible à l'œil nu.





Explication

Les produits utilisés sont simples, mais cette expérience repose sur les principes qui permettent de purifier l'ADN en laboratoire. L'action mécanique de l'écrabouillage abîme les cellules et commence à les séparer les unes des autres. Le liquide vaisselle déstabilise les membranes lipidiques, c'est-à-dire les couches de gras qui délimitent les cellules et leur noyau, ce qui libère l'ADN qui s'y trouvait. La présence de sel conduit les microscopiques morceaux d'ADN à se coller les uns aux autres : ils deviennent alors visibles, comme la poussière qu'on rassemble en passant le balai dans une pièce qui paraissait propre. Ces paquets d'ADN ne sont pas solubles dans l'éthanol, au contact duquel ils forment des précipités blancs faciles à voir. Comme quoi, on n'a pas forcément besoin de microscope pour observer une toute petite molécule !

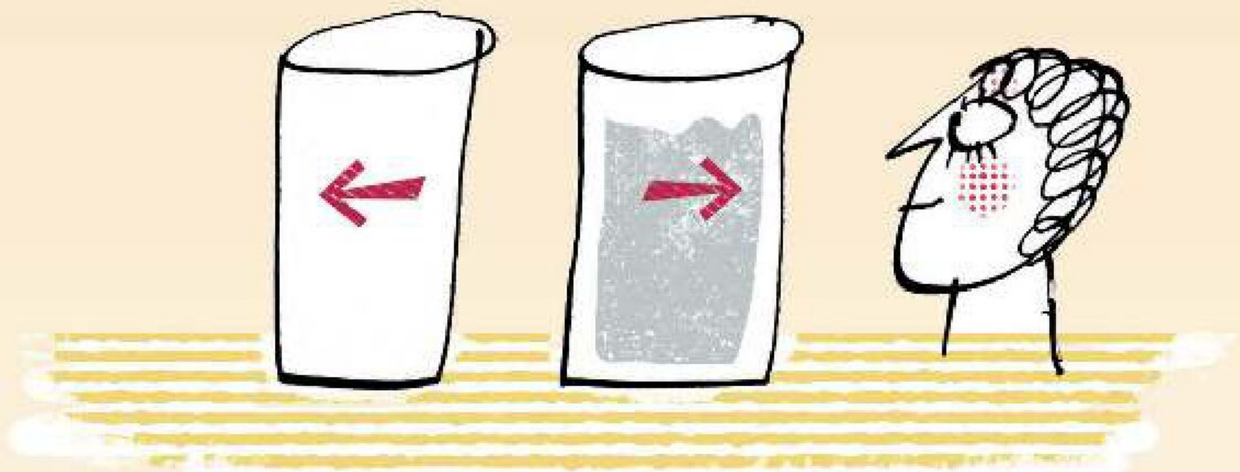
sciav.fr/adnbanane

Bonus

Si vous voulez voir votre propre ADN plutôt que celui d'une banane, appuyez sur vos joues pour les frotter contre vos dents pendant une trentaine de secondes et faites un bain de bouche avec de l'eau salée. Crachez ensuite cette eau dans un verre, ajoutez quelques gouttes de liquide vaisselle, mélangez puis versez un peu d'éthanol.

❼ La réfraction

Ou comment l'eau met le monde à l'envers



Matériel nécessaire
- Du papier
- Un feutre
- Un verre
- De l'eau

Durée : 5 minutes
Difficulté : facile

Un verre d'eau sur une table n'a à priori rien d'étonnant. On voit mal comment il pourrait nous retourner le cerveau. Et pourtant…

Description
Dessinez une flèche horizontale sur un morceau de papier et fixez celui-ci verticalement, avec de l'adhésif ou en le posant contre un support. Placez un verre devant ce dessin, à une dizaine de centimètres de distance, et baissez-vous pour pouvoir regarder au travers : vous devez voir la flèche entière dans le verre par transparence. Le plus dur est fait ! Il ne reste qu'à remplir le verre avec de l'eau en continuant à regarder la flèche. Quand celle-ci sera atteinte par le niveau de l'eau, elle va se retourner sous vos yeux.

Explication
Évidemment, le dessin d'origine n'a pas changé. Mais l'eau a modifié la trajectoire de la lumière qui en provient. En effet, les rayons lumineux sont déviés au niveau de l'interface entre des milieux aux propriétés différentes, comme l'air et l'eau. Ce phénomène s'appelle la réfraction, et c'est aussi lui qui donne l'impression qu'une paille plongée dans un verre d'eau est discontinue au niveau de la surface.
Ici, la réfraction due à l'eau se combine avec la forme ronde du verre pour transformer l'ensemble en une lentille convergente. Les rayons lumineux finissent par se croiser et ceux qui étaient à gauche au niveau du dessin finissent à droite dans nos yeux et inversement, ce qui retourne la flèche. Vous pouvez faire des tests : vous ne verrez pas de changement avec un verre carré ou une flèche verticale.

sciav.fr/réfraction

❽ Le serpent du Pharaon

Ou comment dompter un reptile avec du sucre

Matériel nécessaire
- Un récipient résistant à la chaleur
- Un bol
- Une cuillère
- Du sable
- Du bicarbonate de soude
- Du sucre glace
- Un liquide inflammable, comme de l'éthanol ou de l'alcool à brûler
- Des allumettes

Durée : 10 minutes
Difficulté : intermédiaire

Faire cuire du sucre pour réussir un caramel est un exercice un peu délicat. En général, on essaie d'éviter de le brûler. Et pourtant…

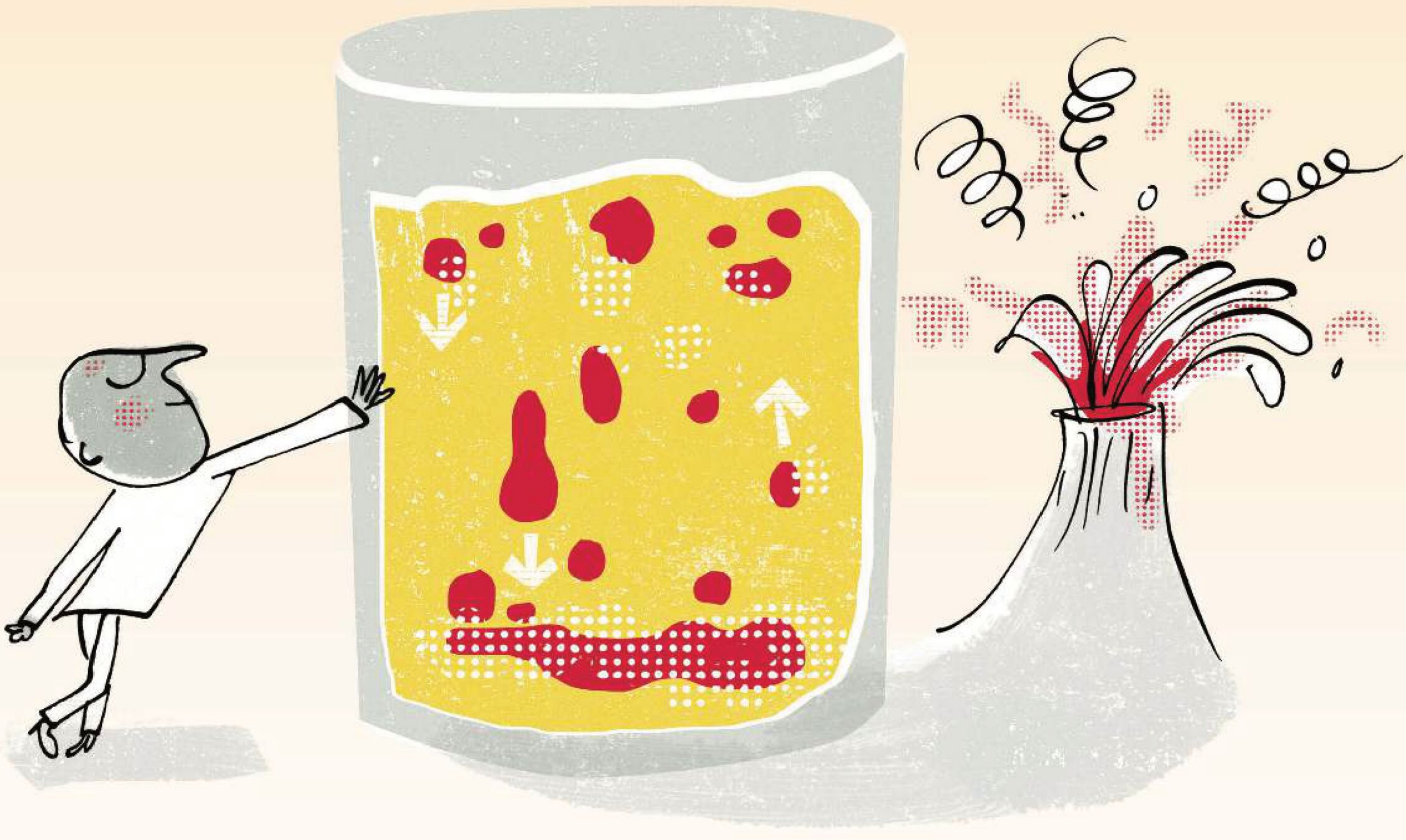
Description
❶ Dans un récipient résistant à la chaleur, faites un petit tas avec du sable et creusez un cratère à son sommet. Parallèlement, mélangez une cuillère de bicarbonate de soude avec quatre cuillères de sucre glace, puis imbibez cette poudre avec un liquide inflammable, comme de l'éthanol ou de l'alcool à brûler, pour obtenir une pâte assez compacte.
Enfin, disposez cette pâte dans le cratère de sable, tassez-la un peu et allumez-la avec un briquet ou une allumette.

❷ Des protubérances noires vont se former et se mettre à grandir. Cela prend un peu de temps, mais si la combustion se passe bien et que votre mélange était assez tassé, une sorte de grand serpent noir va pousser lentement dans votre feu, semblant surgir du sable ! Vous pouvez utiliser des fourchettes ou d'autres objets suffisamment longs pour le guider pendant sa croissance sans trop approcher vos mains des flammes.

Explication
Cette forme impressionnante n'est autre que du caramel carbonisé. Le sucre noircit en brûlant et fige quand il refroidit. Parallèlement, le bicarbonate de soude libère du CO_2 gazeux sous l'effet de la chaleur. Celui-ci aère le sucre qui brûle, et la combinaison des deux donne naissance à une longue mousse noire, très légère et friable une fois refroidie. Quand vous aurez terminé l'expérience, vous pourrez la jeter à la poubelle comme n'importe quelle tentative culinaire ratée. Mais faites attention au sable, qui reste chaud assez longtemps.

sciav.fr/serpentdefeu

⚠ Cette expérience n'est pas censée être dangereuse, mais elle implique du feu. Pour la réaliser, installez-vous dans une zone sécurisée, idéalement en extérieur (pas de produit toxique à redouter, mais ça sent le brûlé), et gardez de l'eau à portée de main au cas où.



9 La lampe à lave maison

Ou comment rendre le vinaigre hypnotisant

Matériel nécessaire
- Du vinaigre
- Du bicarbonate de soude
- Du colorant alimentaire
- De l'huile assez translucide
- Deux récipients, dont l'un haut et transparent

Durée : 10 minutes
Difficulté : facile

L'exemple précédent donne l'impression qu'il faut un peu de logistique pour réaliser des expériences avec du bicarbonate de soude, et que le résultat est impressionnant mais pas très joli. Et pourtant…

Description
Dans un premier récipient, mélangez du vinaigre avec du colorant alimentaire pour lui donner la couleur de votre choix. Dans un second récipient, idéalement haut et transparent, comme un verre, versez du bicarbonate de soude sur environ un centimètre de hauteur. Puis complétez avec de l'huile jusqu'aux deux tiers du récipient. Ajoutez ensuite un peu de votre vinaigre coloré et attendez quelques minutes : les gouttes colorées vont d'abord tomber au fond du récipient puis se mettre en mouvement pour remonter à la surface avant de retomber, et ainsi de suite… Exactement comme dans une lampe à lave !

Explication
Deux choses expliquent ce comportement hypnotisant : la différence de densité entre l'huile et le vinaigre, et la réaction chimique entre le vinaigre et le bicarbonate de soude. Dans un premier temps, le vinaigre coule au fond du verre parce qu'il est moins dense que l'huile. Il se retrouve alors en contact avec le bicarbonate de soude. Or, ces deux produits réagissent spontanément ensemble pour former du CO_2 sous forme gazeuse. Vous pouvez d'ailleurs en mélanger un peu dans un autre récipient pour observer le résultat : ça mousse (et les enfants adorent).
Ici, le gaz est initialement piégé sous la couche d'huile. Il s'accumule autour des gouttes de vinaigre coloré en formant des bulles. Quand la quantité de gaz est suffisante, ces bulles agissent comme de petites bouées et font remonter le vinaigre à travers l'huile jusqu'à atteindre la surface. Les bulles y libèrent leur contenu en gaz, qui rejoint l'air ambiant, et le vinaigre se retrouve à nouveau plus dense que l'huile, ce qui le fait retomber au fond du verre où il rejoint le bicarbonate de soude. Et ainsi de suite…
L'expérience marche tant qu'il reste de l'acide dans le vinaigre ou du bicarbonate de soude au fond du verre. Si le mouvement s'arrête mais que de la poudre blanche est encore visible sous l'huile, il suffit de rajouter du vinaigre pour relancer l'expérience !

Bonus
En personnalisant la couleur des gouttes et la forme du récipient, vous aurez une super déco pour une fête d'anniversaire à thème ou une soirée de Halloween. Vous pouvez même ajouter des paillettes. Pensez juste qu'il faudra ensuite nettoyer un récipient qui aura contenu de l'huile : il vaut mieux éviter les formes compliquées.

sciav.fr/lalampeàlave

LES BIZARRERIES DU VIVANT

Minuscule par rapport à la femelle, le mâle *Melanocetus johnsonii* – ou baudroie des abysses – la mord pour s'accrocher à elle, jusqu'à ce que leurs peaux et leurs vaisseaux sanguins fusionnent. Ainsi nourri par sa comparse, il voit ses organes s'atrophier peu à peu. Et finit par ne plus être qu'une poche à spermatozoïdes…

EDITH A. WIDDER

SEXUALITÉ ANIMALE

Toutes les **pratiques** sont dans la **nature**

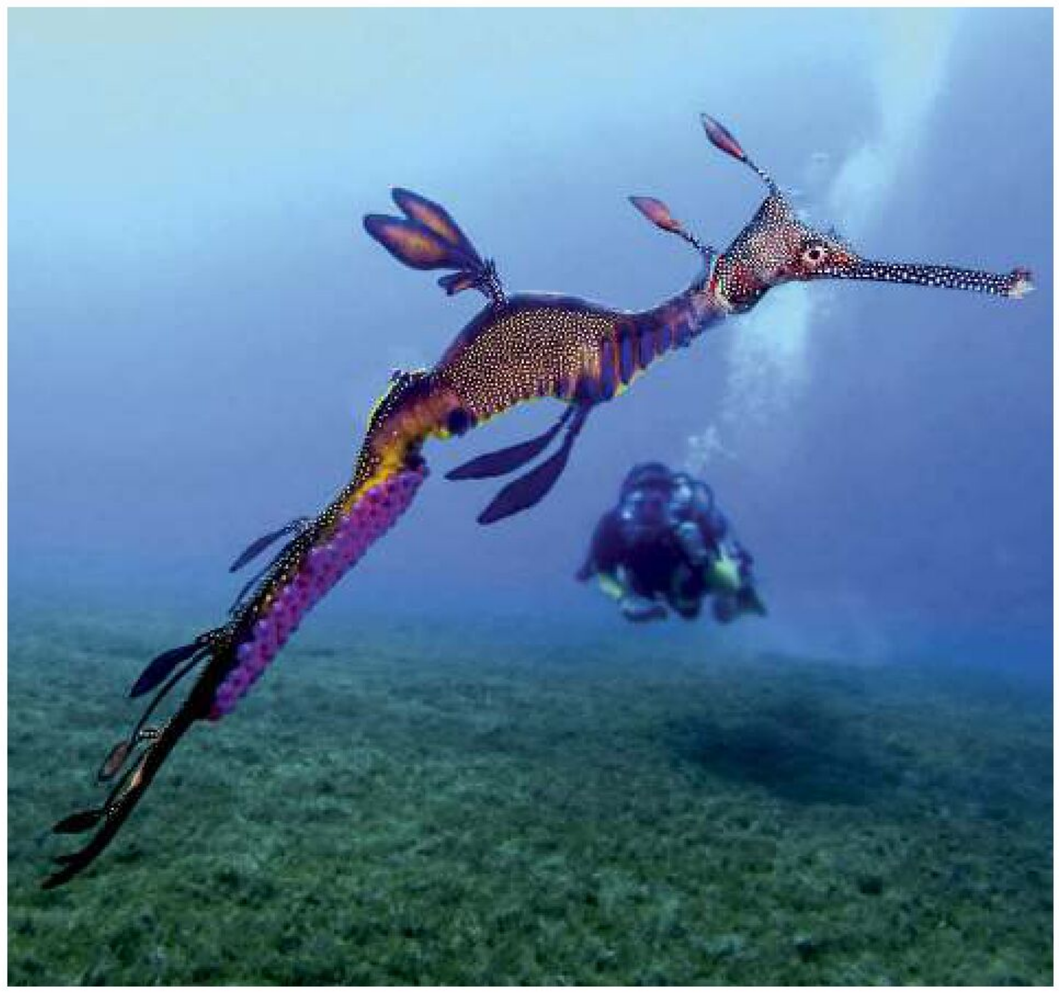
La sexualité, une partie de plaisir ? Parlez-en à la femelle bruche, dont l'organe génital est déchiré par son comparse, ou au mâle baudroie des abysses, qui fond peu à peu en s'accouplant. Heureusement, d'autres stratégies reproductrices s'avèrent moins dangereuses pour les protagonistes… Florilège de pratiques et d'organes incongrus.

Du porc-épic urinant sur sa compagne pour provoquer son ovulation à l'échidné pourvu d'un improbable phallus à quatre glands, en passant par les marsupiaux *Antechinus* se reproduisant frénétiquement jusqu'à mourir d'épuisement, le monde animal regorge d'une incroyable diversité de stratégies, comportements et organes sexuels tous plus étranges les uns que les autres. Mais pourquoi une telle exubérance quand il est question de s'acoquiner ?

En réalité, il fut un temps où la chose était des plus simples. Il y a plus d'un milliard d'années, la reproduction sexuée résultait de la rencontre entre deux gamètes strictement identiques. Jusqu'à ce que certains organismes se mettent à faire de plus petits gamètes, bénéficiant ainsi d'un sacré coup de pouce évolutif : la production de chaque gamète nécessitant moins d'énergie, il devient possible d'en fabriquer beaucoup plus et donc d'obtenir une descendance potentiellement plus nombreuse. À condition toutefois que ces petits gamètes, moins riches en ressources nutritives pour le futur embryon, fusionnent avec de plus gros qui compenseront ce déficit. Quelques centaines de millions ◆◆◆

Pénis femelles, spermatozoïdes géants…

C'est une règle immuable en zoologie : aucune règle n'est immuable. Particulièrement en matière de reproduction, car le monde vivant regorge de contre-exemples et d'exceptions. Les gamètes mâles sont par définition très petits ? Parlez-en à la mouche *Drosophila bifurca*, dont le mâle mesurant à peine 3 millimètres produit des spermatozoïdes de 6 centimètres chacun. Lors de la copulation, ces spermatozoïdes géants passent par une structure génitale qui les enroule comme une pelote de laine et les envoie un par un à l'intérieur de la femelle. Les mâles multiplient les conquêtes, laissant aux femelles l'élevage des petits ? Les contre-exemples de « bons pères » sont légion, de l'hippocampe au crapaud accoucheur, sans pour autant égaler le jacana noir. Cet oiseau sud-américain inverse radicalement les rôles : les femelles se battent entre elles pour obtenir les faveurs des mâles, laissant ensuite ces derniers s'occuper seuls de la couvaison puis de l'éducation des petits. Enfin, les insectes du genre *Neotrogla* inversent eux aussi les rôles, mais d'un point de vue morphologique cette fois. Les femelles sont dotées d'un organe ressemblant furieusement à un pénis qu'elles utilisent pour pénétrer les mâles jusqu'à 70 heures durant, afin d'aspirer leurs spermatozoïdes via ce curieux phallus féminin.



PAULO DE OLIVEIRA / BIOSPHOTO

Comme l'hippocampe, le mâle dragon des mers (*Phyllopteryx taeniolatus*) porte ses œufs dans une poche située sous la queue.

TELEGRAMME/MAXPPP

« CES CHOIX EFFECTUÉS PAR LES FEMELLES DIRIGENT L'ÉVOLUTION. L'OBJECTIF DES MÂLES EST DE DÉVELOPPER DES STRATÉGIES POUR LES CONTOURNER ET LIMITER CETTE SÉLECTION »

Thierry Lodé, professeur d'écologie évolutive à l'université Rennes-I

◆◆◆ d'années d'évolution plus tard, ces deux stratégies poussées à leur paroxysme sont devenues la norme chez les animaux. *« C'est la définition même des mâles et des femelles : les premiers possédant de petits gamètes mobiles, les spermatozoïdes, les secondes produisant de gros gamètes nutritifs, les ovocytes,* rappelle Sylvain Billiard, maître de conférences à l'université de Lille. *Ceci va entraîner les deux sexes vers des stratégies de reproduction, des comportements et même des morphologies très différentes. »*

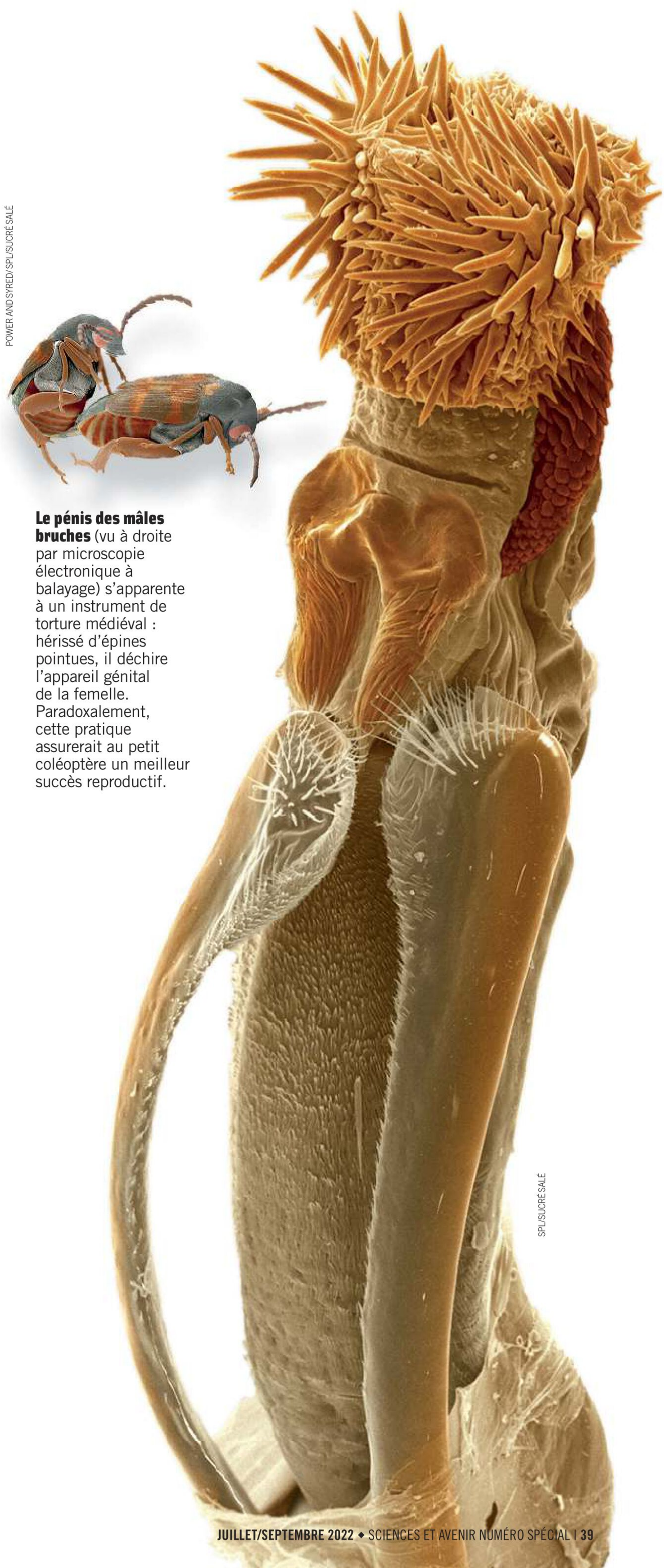
Ainsi, alors que les mâles aux innombrables gamètes chercheront plutôt à multiplier les conquêtes, se parant d'atours de séduction, les femelles auront tendance à miser sur le qualitatif en fournissant les ressources nécessaires au développement et à la survie de leurs rejetons. En matière de dimorphisme sexuel, certains animaux ont poussé ce cloisonnement des rôles si loin que mâles et femelles semblent appartenir à des espèces totalement différentes. Chez les vers marins du genre *Osedax,* par exemple, les mâles sont plusieurs dizaines de milliers de fois plus petits que les femelles et vivent à l'intérieur même de ces dernières, constituant un véritable harem d'une centaine d'amants microscopiques. Toujours dans les profondeurs, la différence de taille entre les deux sexes chez la baudroie des abysses n'est pas aussi spectaculaire (le mâle n'est que cinq fois plus petit), mais l'espèce compense par une autre étrangeté : lorsqu'un mâle rencontre sa gigantesque compagne, il la mord sans plus jamais desserrer sa mâchoire. Au fil du temps, sa peau et son système sanguin fusionnent avec ceux de sa dulcinée, ses organes devenus inutiles (yeux, nageoires…) disparaissent. Il ne subsiste au final qu'une simple poche de chair pourvoyeuse de spermatozoïdes, accrochée à la femelle.

L'intensité de la couleur des pattes, critère de choix du partenaire

Ce type de comportement, et plus globalement le fait de déléguer à la femelle la majeure partie des coûts de la reproduction (l'apport nutritif initial des gamètes, mais aussi l'allaitement et l'élevage des petits…), a poussé certains biologistes à parler de véritable « parasitisme du mâle », qui transmet son patrimoine génétique sans subir les inconvénients de la reproduction. Outre la baudroie des abysses, le terme prend tout son sens chez les punaises Zeus, dont le mâle élit domicile sur sa compagne. L'indélicat

se laisse ainsi transporter des semaines durant tout en se nourrissant d'une substance sécrétée par le dos de sa partenaire.

Avec une reproduction bien plus coûteuse pour la femelle, qui possède de surcroît un nombre limité de gamètes, celle-ci a tout intérêt à choisir le meilleur père pour sa progéniture – celui dont les gènes garantiront les meilleures chances de survie. Les critères de choix sont parfois des plus surprenants. Dans le Pacifique, les fous à pieds bleus femelles se basent sur l'intensité de la couleur des pattes de leurs aspirants. En Australie, le jardinier satiné est jugé sur ses talents de constructeur : pour convaincre sa belle, ce volatile bâtit une arche monumentale à base de brindilles entremêlées, qu'il repeint à l'aide d'un morceau d'écorce badigeonné de baies écrasées. Sur l'île de Nouvelle-Guinée, les paradisiers mâles se livrent quant à eux à des parades nuptiales aussi complexes qu'interminables. La palme revenant au paradisier de Carola, dont un ornithologue américain a identifié pas moins de cinquante-huit éléments de danse agencés en vingt séquences distinctes.



POWER AND SYRED/SPL/SUCRÉ SALÉ

Le pénis des mâles bruches (vu à droite par microscopie électronique à balayage) s'apparente à un instrument de torture médiéval : hérissé d'épines pointues, il déchire l'appareil génital de la femelle. Paradoxalement, cette pratique assurerait au petit coléoptère un meilleur succès reproductif.

SPL/SUCRÉ SALÉ

Un phallus sans orifice dont le rôle unique serait de donner du plaisir

Enfin, toujours chez les volatiles, la femelle alecto à bec rouge pourrait bien choisir ses amants selon le plaisir qu'ils lui donnent. Alors que la plupart des oiseaux sont dépourvus de pénis, copulant simplement cloaque contre cloaque, ce passereau africain semble en posséder un… en apparence seulement. Ce pseudo-phallus n'étant pourvu d'aucun orifice, son unique rôle semble se résumer à donner du plaisir. Les mâles dotés d'un organe plus long que les autres se retrouvent en tout cas à la tête d'un harem.

« *Ce sont tous ces choix effectués par les femelles qui dirigent l'évolution*, raconte Thierry Lodé, professeur d'écologie évolutive à l'université Rennes-I. *Du côté des mâles, l'objectif sera au contraire de limiter cette sélection en développant des stratégies pour contourner leur choix.* » Pour bon nombre d'espèces, ce contournement ne se fera pas en douceur. Chez la punaise des lits, le mâle se contente de transpercer au hasard la carapace de la femelle pour y injecter sa semence. Chez les canards, les mâles s'imposeront eux aussi majoritairement par le viol, bien aidé ◆◆◆

◆◆◆ chez certaines espèces par un pénis démesuré (le record est de 42 centimètres !) capable d'érections « explosives », se déployant en moins d'une demi-seconde à l'intérieur de la femelle. *« En réponse, celle-ci a développé un vagin formant un véritable labyrinthe, qu'elle pourrait contrôler afin de laisser passer ou non le sperme, et finalement choisir tout de même quel mâle la fécondera »*, décrit Thierry Lodé.

Les bruches, de petits coléoptères bien innocents au premier abord, offrent un autre exemple de cette course à l'armement entre les deux sexes. Les mâles possèdent un organe reproducteur éminemment destructeur, sorte de masse médiévale couverte de piques acérées. Cette forme pourrait à la fois les aider à maintenir la femelle en place et favoriser la diffusion du sperme. Si les femelles ont évolué en retour vers un appareil reproducteur renforcé pour limiter la casse, beaucoup sont gravement blessées par ces pénétrations, parfois jusqu'à la mort.

SHUTTERSTOCK

Le sexe du canard sauvage mâle s'adapte au vagin de la femelle, en forme de tire-bouchon. Celle-ci a développé ce type d'organe génital pour contrer le viol explosif du mâle et contrôler qui la fécondera.

CHEZ CERTAINES ESPÈCES HERMAPHRODITES, ON ASSISTE À DE VÉRITABLES DUELS À COUPS D'ORGANES REPRODUCTEURS, CHACUN TENTANT DE PÉNÉTRER L'AUTRE EN PREMIER AVANT DE S'ENFUIR, LAISSANT AU PERDANT LES JOIES DE LA MATERNITÉ

Pour un mâle, réussir à copuler n'est en outre qu'une première étape vers la reproduction : il doit aussi s'assurer qu'il sera bien le père de la future progéniture. Chez de nombreux insectes, mollusques et araignées, les femelles disposent en effet de spermathèques, organes permettant de stocker les spermatozoïdes, où se diluent les contributions des différents amants. Avant de copuler, le mâle libellule saisit donc fermement sa compagne à l'aide de pinces abdominales et entreprend de nettoyer méticuleusement la spermathèque via son pénis, retirant le sperme déjà présent. Chez de nombreuses espèces (rongeurs, reptiles, vers…), le mâle préférera laisser dans l'appareil reproducteur femelle un « bouchon copulatoire », une substance dense qui bloquera le passage au mâle suivant.

Devant une telle concurrence, une telle lutte acharnée entre les deux sexes, l'hermaphrodisme semble être une manière plus sereine d'envisager la reproduction, avec de plus quelques avantages non négligeables. *« Cela permet déjà de doubler les chances de se reproduire, puisqu'il devient possible de s'accoupler avec n'importe quel partenaire, voire de s'autoféconder »*, décrit Patrice David, directeur de recherche au Centre d'écologie fonctionnelle évolutive. Le chercheur et son équipe ont cependant montré expérimentalement qu'une telle autofécondation finissait par réduire la diversité génétique et donc l'adaptation au milieu.

Mais même chez les espèces hermaphrodites, le conflit entre mâles et femelles n'est jamais bien loin, comme l'illustre *Pseudoceros bifurcus*. Lorsque deux de ces nudibranches se rencontrent, un véritable duel se joue à grands coups d'organes reproducteurs, chacun tentant de pénétrer l'autre en premier avant de s'enfuir, laissant au perdant les joies de la maternité. Un conflit sexuel que l'on retrouve aussi chez les hermaphrodites successifs, qui changent de sexe au cours de leur existence. Si certains, comme le gobie vert, opèrent leur transition après avoir trouvé l'âme sœur, pour s'assurer de former un couple hétérosexuel fertile, d'autres procèdent à des choix plus tactiques. *« Lorsqu'il y a une très forte compétition entre mâles, certains poissons hermaphrodites préfèrent rester femelles jusqu'à être suffisamment forts pour entrer dans la compétition, ou jusqu'à ce que le mâle dominant se retrouve en mauvaise posture »*, décrit Patrice David.

Si l'hermaphrodisme semble avoir autant d'atouts, pourquoi n'est-il pas plus répandu dans le monde animal ? *« C'est une bonne question, à laquelle nous n'avons pas vraiment de réponse !* s'amuse Sylvain Billiard. *En réalité, la sélection naturelle ne va jamais favoriser une seule stratégie, plusieurs peuvent même cohabiter au sein d'une même espèce. »* De quoi offrir tout un éventail de pratiques sexuelles à faire rougir les naturalistes.

YANN CHAVANCE

Mathieu Keller, *Les Animaux et le sexe*, Quae, 2018

Thierry Lodé, *Tous les sexes sont dans la nature,* HumenSciences, 2022. *La Guerre des sexes chez les animaux,* Odile Jacob, 2007

Emmanuelle Pouydebat, *Sexus animalus,* Arthaud, 2020

AUTODÉFENSE

« Entre la plante et ses agresseurs, une incessante course à l'armement ! »

Le système immunitaire des végétaux s'appuie sur des protéines capables de reconnaître les attaques des pathogènes… et de déclencher la production d'un cocktail d'armes chimiques mortelles.

Lorsqu'ils sont attaqués par un pathogène, les végétaux savent que leur organisme est en danger… mais comment ?

Bien que sans cerveau, il leur faut effectivement une certaine « conscience de soi » pour comprendre qu'un intrus – champignon, virus ou bactérie – est en train de pénétrer leurs cellules et qu'il est urgent de se défendre !
Le système agit de deux façons, à travers des processus chimiques. La première, c'est la reconnaissance d'une présence étrangère, du « non-soi ». La seconde, la détection d'une manipulation moléculaire de l'organisme par le pathogène, un « soi modifié ». La plante vérifie en permanence que tout se passe bien au sein de ses cellules.

THOMAS KROJ INRAE

THOMAS KROJ

Chercheur au Plant Health Institute of Montpellier

Comment fait-elle pour déceler les assaillants ?

À la différence de la plupart des animaux, les végétaux n'ont pas de cellules ou d'organes destinés à leur protection. Leur système immunitaire, inné, est réparti dans tout l'organisme : chacune des cellules recèle des protéines nommées récepteurs qui reconnaissent les pathogènes, un peu à la manière d'un radar.
Pour contourner ce système de défense, les agresseurs microbiens utilisent tous les moyens à leur disposition. Ils sécrètent par exemple des armes moléculaires, nommées effecteurs, qui inactivent les récepteurs.
Les plantes, de leur côté, développent des récepteurs qui reconnaissent spécifiquement ces effecteurs… C'est une incessante course à l'armement, qui a créé des systèmes chimiques d'une grande complexité : par exemple, sur les 40 000 gènes du riz, 700 codent pour les deux familles de récepteurs immunitaires majoritaires. Le problème, c'est qu'en termes de coévolution, les plantes ont facilement un temps de retard sur l'agresseur : celui-ci est acharné, car il n'a pas d'autre choix, pour perpétuer son espèce, que de se nourrir de la plante.

Comment les plantes réagissent-elles aux attaques des pathogènes ?

Elles ont développé deux tactiques. La première, celle de la terre brûlée. Des cellules sont sacrifiées, ce qui permet de circonscrire la maladie. La seconde, une réaction chimique puissante : un mélange complexe de plus d'une centaine de composés antibiotiques. Chaque plante a son propre patrimoine génétique, lui permettant de répondre ou non à un agresseur. Au sein d'une espèce, des individus sont ainsi protégés contre les attaques d'un champignon, d'un insecte ou d'une bactérie, et d'autres non. Cette biodiversité génétique garantit la pérennité du groupe. Le problème, en agriculture, c'est que toutes les plantes possèdent le même capital génétique et présentent donc les mêmes faiblesses face aux maladies.

L'humain peut-il améliorer ce système de défense ?

Nous nous sommes intéressés à une maladie du riz, la pyriculariose, provoquée par un champignon microscopique. Nous avons étudié à l'échelle atomique les propriétés d'un récepteur immunitaire qui agit comme un leurre contre les agents pathogènes, et nous avons trouvé un moyen d'apprendre à cette protéine à reconnaître de nouvelles signatures moléculaires du champignon. Ceci, afin d'induire une réponse du système immunitaire de la plante. Cela ouvre une nouvelle voie de protection des cultures… sans produits chimiques.

PROPOS RECUEILLIS PAR LOÏC CHAUVEAU

DAVID FLEETHAM/NATUREPL.FR

Pour échapper à son prédateur, une otarie des Galápagos (*Zalophus wollebaeki*, au centre), chacune des gorettes rayées (*Xenocys jessiae*) de ce banc se base sur l'attitude d'une ou deux de ses voisines immédiates.

INTELLIGENCE COLLECTIVE

Les champions de la synchronisation

Par milliers, ils ondulent à l'unisson sans se heurter ni suivre un leader… Les scientifiques commencent à décrypter les merveilleux ballets des étourneaux ou des nez-rouges amazoniens.

Dans le ciel, des étourneaux forment d'immenses et mouvantes nuées sans jamais se heurter. En mer, les bancs de poissons exécutent d'harmonieuses chorégraphies… *« Ces organisations collectives s'observent à toutes les échelles du vivant, des bactéries aux grands mammifères,* rappelle Guy Théraulaz, éthologue au Centre de recherche sur la cognition animale à Toulouse. *Elles permettent aux individus d'augmenter leurs chances de survie. »* Regroupés en formation serrée, ils échappent en effet plus facilement aux prédateurs… et explorent un espace de chasse plus important.

Mais comment fonctionne cette intelligence collective ? Une question longtemps restée insoluble, tant ces phénomènes s'avéraient complexes à étudier. *« Aujourd'hui, les observations faites dans la nature et en laboratoire, combinées avec l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique, nous font pénétrer au sein des mécanismes qui permettent à ces animaux de coordonner leurs comportements »,* souligne Guy Théraulaz. Si les nuées d'étourneaux demeurent difficiles à comprendre, on sait tout de même depuis 2010 que

chaque oiseau se réfère aux sept individus les plus proches, quelle que soit leur distance. Quant aux bancs de poissons, grâce à l'observation en aquarium de petits nez-rouges amazoniens *(Hemigrammus bleheri)*, Guy Théraulaz et son collègue Lesi Liu ont apporté en 2020 une réponse à quelques questions cruciales. C'est ainsi la distance entre individus qui permet leur alignement : *« Quand deux poissons sont séparés d'une distance de deux fois leur corps, ils s'éloignent. Mais ils ont besoin de se rapprocher lorsque la distance entre eux fait six fois leur corps. La distance de confort, c'est trois corps »*, détaille l'éthologue. L'individu se situe aussi dans le collectif grâce à l'angle sous lequel il voit le poisson le plus proche. *« Dès qu'un poisson change de comportement, parce qu'il a par exemple détecté la présence d'un prédateur, l'information se propage instantanément à l'ensemble des individus. Le banc bascule alors d'une forme à une autre et fuit »*, poursuit Guy Théraulaz. Le milieu aquatique permet par ailleurs de former des structures en trois dimensions, alors que les oiseaux volent sur un même plan horizontal qui se plie et se déplie comme une feuille. Autre certitude : pas de chef qui orchestrerait le mouvement. *« Chaque poisson, lorsqu'il change de direction et de vitesse, n'est influencé que par un ou deux de ses voisins »*, affirme l'éthologue. Un résultat qui suscite de nouvelles questions : comment peut donc se construire un phénomène de grande ampleur fondé sur des relations individuelles ?

LOÏC CHAUVEAU

BIOLUMINESCENCE

Une étrange lueur venue de l'intérieur

Euprymna scolopes et *Vibrio fischeri* sont deux espèces fascinantes. La première est une petite seiche de 3 à 4 centimètres de long qui vit dans les eaux du Pacifique, à hauteur des îles Hawaï. La seconde, une bactérie luminescente qui tapisse le ventre de la première. La nuit, elle émet une lumière spectrale dont les variations suivent celles de l'éclairage lunaire, si bien qu'elle et ses congénères dissimulent l'ombre du calmar à ses prédateurs, qui évoluent en dessous. Leurrés, ces derniers ignorent le céphalopode, qui peut se livrer tranquillement à ses activités de chasse… En échange de ces bons procédés, il nourrit les bactéries avant, à l'aube, d'éteindre la lumière, en expulsant 95 % de ses hôtes devenus bouches inutiles ! Les 5 % restants se multiplieront tout au long de la journée et seront assez nombreux, à la nuit tombée, pour de nouveau produire une lueur. *« Il y a deux façons d'être lumineux,* résume Marc-André Selosse, biologiste au Muséum national d'histoire naturelle. *Certaines espèces possèdent l'enzyme qui le permet, la luciférase. C'est le cas de* Vibrio fischeri*. D'autres, comme* Euprymna scolopes, *s'associent avec un compagnon doté de cette aptitude. » Vibrio fischeri* vit également librement dans la mer, en colonies, où ses ennemis principaux sont des microbes plus gros qu'elle. Sa luminescence lui sert alors à attirer des crustacés qui mangeront ses prédateurs. Plus fort encore : elle est utilisée par les poissons des grands fonds qui l'embarquent dans des poches internes pour éclairer l'entrée de leur gueule, attirant les rares proies qui rôdent dans ces immensités obscures, et parfois même des partenaires sexuels ! La grande majorité des êtres bioluminescents sont ainsi des bactéries qui ont besoin de vivre en symbiose. La production de lumière demande en effet beaucoup d'énergie, ce qui réduit les capacités à chercher soi-même sa nourriture.

MARC-ANDRÉ SELOSSE

« IL Y A DEUX FAÇONS D'ÊTRE LUMINEUX : POSSÉDER UNE ENZYME, LA LUCIFÉRASE, OU S'ASSOCIER À UN COMPAGNON DOTÉ DE CETTE APTITUDE »

Marc-André Selosse, biologiste

La luciole fait figure d'exception dans le monde animal. Si la femelle de ce coléoptère produit de la lumière pour trouver un partenaire sexuel, c'est que, dépourvue d'ailes, elle se déplace difficilement. Quant aux champignons, nombre de chercheurs se penchent sur des décomposeurs de bois que l'on retrouve dans des îles japonaises. *« Mais on a beau se creuser la tête, on ne voit pas bien à quoi peut leur servir de briller dans le noir »*, reconnaît, dépité, Marc-André Selosse. **L. C.**

SO YAMASHITA

Mycena chlorophos fait partie des plus de 80 espèces de champignons bioluminescents, tous décomposeurs de bois.

Comment nourrir sa descendance ? La guêpe émeraude enterre un cafard préalablement drogué et sur lequel elle a collé son œuf. Une fois éclose, la larve pourra dévorer son hôte… vivant.

EMANUELE BIGGI

PARASITISME

La fin tragique des animaux zombies

L'évolution parallèle d'un parasite et de son hôte peut se résumer à une course à l'armement : le premier développe des stratégies pour profiter du gîte et du couvert aux dépens du second ; celui-ci, à son tour, élabore des moyens pour se défendre… Certains parasites vont jusqu'à compter dans leur arsenal des outils de manipulation mentale capables de modifier le comportement de leur hôte. C'est le cas de la guêpe émeraude, qui fait à sa cible, un cafard bien plus gros qu'elle, deux piqûres stratégiques. La première, paralysante, lui permet dans un second temps de cibler avec précision les ganglions cérébraux du cancrelat. Ce dernier, sous emprise, suit alors docilement la guêpe qui le guide jusqu'à son tombeau : une cavité dans laquelle la victime sera enfermée avec la larve de son bourreau, prête à la dévorer vivante. Au Costa Rica, la larve d'une autre guêpe parasite fait connaître un sort similaire à l'araignée *Leucauge argyra*… non sans l'avoir forcée à travailler pour elle avant de mourir. Après plusieurs jours accrochée à l'araignée, se nourrissant de son hémolymphe, la larve la pousse, via un procédé chimique, à construire une toile destinée à accueillir son futur cocon de métamorphose…

Pour de nombreux parasites transitant au cours de leur vie par plusieurs espèces-hôtes, la manipulation mentale est un bon moyen de passer d'une victime à l'autre. La douve du foie, un ver parasitant successivement un escargot, une fourmi et un ruminant, modifie le comportement de ladite fourmi en se logeant

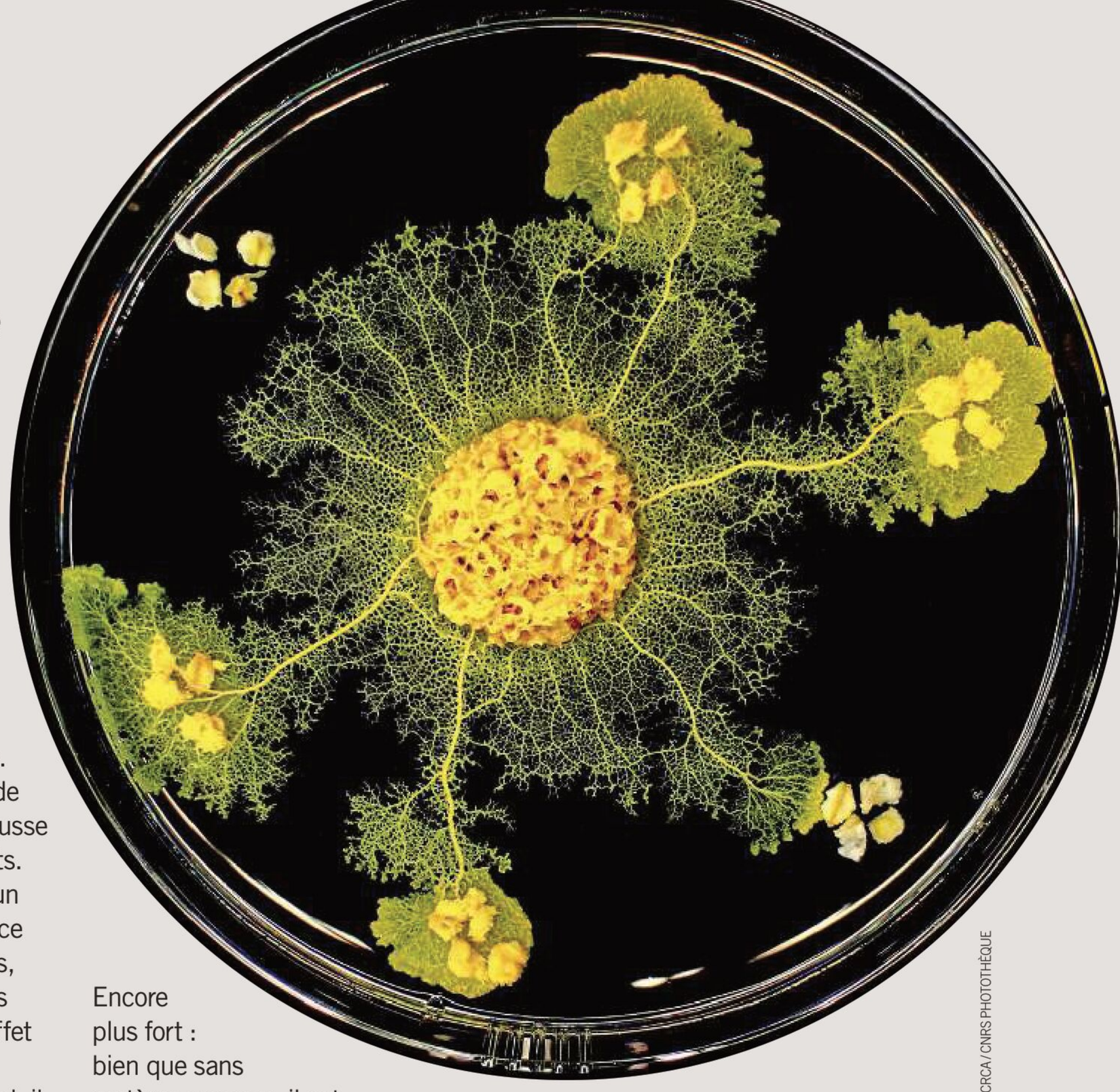
LE CAFARD, TOTALEMENT SOUS EMPRISE, SUIT DOCILEMENT LA GUÊPE QUI LE GUIDE JUSQU'À SON TOMBEAU

dans son cerveau. L'insecte quitte alors chaque soir sa fourmilière pour venir s'agripper au sommet d'un brin d'herbe, ce qui l'expose au broutage d'un ruminant.Pour *Spinochordodes tellinii*, l'enjeu n'est pas tant de changer d'espèce-hôte que de milieu. En effet, les larves de ce long ver vivent aux crochets d'insectes terrestres tandis que les adultes s'épanouissent dans l'eau. Qu'à cela ne tienne : lorsque le ver est prêt à quitter son hôte, il émet un cocktail de molécules qui affecte le système nerveux de l'insecte, le poussant à se noyer dans la première mare venue. Moins barbare, la guêpe *Dinocampus coccinellae* ne demande que protection à la coccinelle qu'elle sollicite pour garder sa larve le temps de sa métamorphose. Un virus transmis par le parasite paralysera peu à peu la coccinelle, cette dernière protégeant des prédateurs, par sa simple présence, le fragile cocon glissé entre ses pattes. Après la métamorphose, un quart des coccinelles se libèrent de l'emprise et reprennent une vie normale. Enfin, insectes, araignées et autres arthropodes ne sont pas seuls sensibles aux manipulations mentales. Avant de rejoindre sa destination finale – l'intestin d'un félin –, le parasite responsable de la toxoplasmose peut transiter par un grand nombre de mammifères dont il semble modifier le comportement. Une fois infectés, les rats oublient ainsi leur peur ancestrale des chats, les chimpanzés sont attirés par les léopards, et les jeunes hyènes s'approchent des lions, multipliant par quatre le risque de se faire tuer… et pour le parasite, les chances d'atteindre son but final. **YANN CHAVANCE**

CELLULE GÉANTE

Le blob, défi vivant aux lois de la biologie

De tous les animaux étranges, aucun n'arrive à la cheville du blob. Enfin, façon de parler, s'agissant d'un organisme proche de la flaque et dénué du moindre membre. D'ailleurs, le blob n'est pas un animal. Pas plus qu'un végétal. Ni, non plus, un champignon ! Le séquençage de ses 30 000 gènes a conduit à créer pour lui une famille propre, les mycétozoaires. Le blob tire son nom d'un film de 1958 dans lequel une masse gélatineuse extraterrestre sème la terreur aux États-Unis. Pourtant, *Physarum polycephalum* est bien de chez nous. Totalement inoffensive, cette mousse jaunâtre et visqueuse prospère dans les forêts. Elle présente tout de même un point commun avec son homologue de cinéma : sa croissance exponentielle. Dans des conditions optimales, le blob – constitué d'une seule cellule… mais qui possède 720 types sexuels ! – peut en effet doubler de taille tous les deux jours. Autres caractéristiques bluffantes : presque immortel, il se dessèche pourtant à plus de 29 °C. Mais entre alors en dormance, avant de se régénérer sitôt les conditions redevenues favorables. Coupé en morceaux, il cicatrise en deux minutes… Pour se mouvoir, le blob déploie des pseudopodes qui lui permettent aussi de trouver sa pitance, bactéries ou champignons, qu'il ingère… sans bouche.



AUDREY DUSSUTOUR / CRCA / CNRS PHOTOTHÈQUE

Encore plus fort : bien que sans système nerveux, il est capable de résoudre des problèmes complexes, comme celui de trouver son chemin dans un labyrinthe, et de transmettre ses apprentissages à un congénère en fusionnant avec lui. C'est d'ailleurs par fusion que le 3 juin dernier, à Châteauroux, des lycéens ont constitué le plus long blob du monde : 53,9 mètres ! **HERVÉ RATEL**

Ni animal, ni végétal, ni même champignon – sans bouche ni système nerveux –, *Physarum polycephalum* a pourtant plus d'un tour dans son sac !

ANNE GANTEAUME

« UNE STRATÉGIE CONSISTE À DÉPLOYER DES ARMES DE RÉSISTANCE, L'AUTRE À PROFITER DU FEU POUR SE RÉGÉNÉRER »

Anne Ganteaume, chercheuse à l'Inrae

ÉCOLOGIE

Ces arbres qui jouent avec le feu

Comment survivre aux flammes quand on ne peut pas s'enfuir devant l'incendie ? Lorsque, par exemple, on est un arbre ? *« Deux stratégies émergent,* résume Anne Ganteaume, chercheuse à l'Inrae. *L'une consiste à déployer des armes de résistance, l'autre à profiter du feu pour assurer la survie de l'espèce. »* Pyrophiles et pyrophytes. Comparons deux pinèdes. La première est peuplée de pins sylvestres dont le tronc, protégé par une écorce épaisse, ne comporte aucune branche basse. La canopée, ramassée, domine à plus de dix mètres de hauteur. Au pied, une litière dense. *« L'espèce diminue ainsi ses risques d'inflammabilité en offrant le moins de matière possible au feu et en isolant sa cime »,* décrit Anne Ganteaume. La seconde pinède est composée de pins d'Alep – des « résilients ». Sa canopée est peu élevée et aérée, ses troncs parsemés de branches mortes, sa litière clairsemée. *« Ces espèces émettent par ailleurs des composés organiques volatils très inflammables qui assurent une combustion totale »,* souligne Marc-André Selosse, biologiste au Muséum national d'histoire naturelle. Et des flammes jaillira leur descendance ! *« Juste après l'incendie, une molécule chimique, la butanolide, provoque l'ouverture des pommes de pin jusqu'ici restées fermées. Les graines tombent sur un sol refroidi et "nettoyé" de toute concurrente qui l'empêcherait de pousser, et bénéficient d'un lit de cendres très nourrissant »,* poursuit Marc-André Selosse. Pour les espèces « résistantes », peu importe que les incendies soient fréquents pourvu qu'ils restent mesurés. En revanche, pour que la stratégie des résilients fonctionne, il faut impérativement qu'il n'y ait aucun sinistre pendant quinze ans, temps nécessaire aux jeunes pousses pour arriver à maturité. Une stratégie que le changement climatique pourrait mettre à mal, car on constate une fréquence accrue des mégafeux en Californie, Afrique du Sud, Australie, et sur le pourtour méditerranéen. LOÏC CHAUVEAU

THERMORÉGULATION

Frais comme un zèbre

« Le zèbre est rayé d'une manière qui le rend très visible, et ses rayures ne lui apportent aucune protection dans les plaines ouvertes de l'Afrique du Sud », écrivait Charles Darwin en 1871. Tout dépend de quelle protection l'on parle ! En 2016, le biologiste Tim Caro, de l'université de Bristol (Royaume-Uni), a simulé avec d'autres chercheurs la vision que les prédateurs du zèbre ont de leur proie. Le résultat est sans appel. *« Les lions et les hyènes ne voient les rayures que de très près*, explique-t-il. *Un camouflage ne fonctionnerait donc qu'à une distance très courte, lorsque ces prédateurs pourraient, de toute façon, sentir ou entendre la proie. »* Par ailleurs, au lieu de se cacher, les zèbres fuient leurs prédateurs. Exit donc, à priori, les rayures « camouflage » ; Darwin n'aurait pas eu tout à fait tort…

En revanche, les stries fournissent aux zèbres une protection contre les insectes piqueurs, vecteurs de maladies mortelles comme le rhume équin. Tim Caro a en effet découvert en 2019 qu'elles perturbent les taons quand ils s'approchent des animaux rayés à moins d'un mètre. *« Ils modifient leur trajectoire ou ne parviennent plus à contrôler leur atterrissage… et se heurtent au zèbre »*, souligne le biologiste. Les fines rayures noires provoqueraient un « choc » chez ces grosses mouches, qui ne sauraient pas les distinguer à distance. Aucune preuve, toutefois, qu'elles seraient victimes d'une illusion d'optique.

Autres passionnés du sujet, les zoologistes britanniques Alison et Stephen Cobb suggèrent que les rayures aideraient surtout le zèbre à réguler sa température. En collectant des données sur deux spécimens au Kenya, ils ont remarqué qu'entre 8 h 30 et 15 h 30 – quand le soleil tape le plus fort –, leurs rayures noires étaient constamment de 12 °C à 15 °C plus chaudes que les blanches. Leur théorie, détaillée en 2019 ? *« L'air chaud s'élève des rayures noires et de l'air plus frais venant des bandes blanches le remplace*, suppose Alison Cobb. *Cela provoque un mouvement d'air sur le pelage. L'effet éventail créé par la différence de température facilite l'évaporation de la sueur. Aussi longtemps que le soleil brille, le zèbre reste au frais ! »* L'hypothèse reste à prouver, mais elle alimente un débat toujours vif !

LAUREEN BOUYSSOU

EDWIN GIESBERS/NATUREPL.FR

Les rayures du zèbre serviraient à le protéger de certains insectes, mais aussi à le ventiler !

SURVIE

Petits expulsés, nichée protégée

On pourrait s'imaginer le premier envol d'un oiseau comme un événement particulièrement émouvant. Sans doute, coaché par ses parents, apprend-il à déployer et mouvoir ses ailes. Et puis hop, c'est le grand saut, avant de planer pour de bon. Cette représentation un brin idéalisée est loin de correspondre à la dure réalité qu'est la vie, souvent brève, d'un oisillon. Ainsi, chez certaines espèces d'oiseaux chanteurs comme la paruline azurée ou le bruant des champs, les parents expulsent-ils une partie de leur progéniture hors du nid avant même qu'elle sache voler. Dans une étude menée en 2020, des chercheurs de l'université de l'Illinois (États-Unis) se sont demandé qui était à l'origine de cette éviction précoce : les oisillons, prêts à se rompre le cou pour s'émanciper ? Leurs géniteurs ? La réponse est surprenante : ce sont les parents qui les poussent hors du nid, les exposant au risque de mourir plus tôt que s'ils étaient restés avec eux bien au chaud. Cette pratique semble-t-il brutale résulte en réalité d'une stratégie évolutive bien rodée : en séparant spatialement leurs descendants, les adultes diluent le risque de mortalité de l'ensemble de la nichée, dont les prédateurs ne feraient qu'une bouchée – ce qui augmente les chances qu'au moins un des petits survive jusqu'à son autonomie.

Ce phénomène est surtout observé chez les espèces ayant de grandes couvées et vivant dans des environnements exposés (prairies ou arbustes), celles qui nichent dans des cavités ayant tendance à retarder l'envol de leurs petits.

SARA DE LACERDA

PAULO DE OLIVEIRA / BIOSPHOTO

Le poisson-globe est observé dans les eaux peu profondes des îles Ryukyu (Japon). Le mâle se charge de sculpter un cercle qui servira de nid pour accueillir les œufs de sa partenaire.

REPRODUCTION

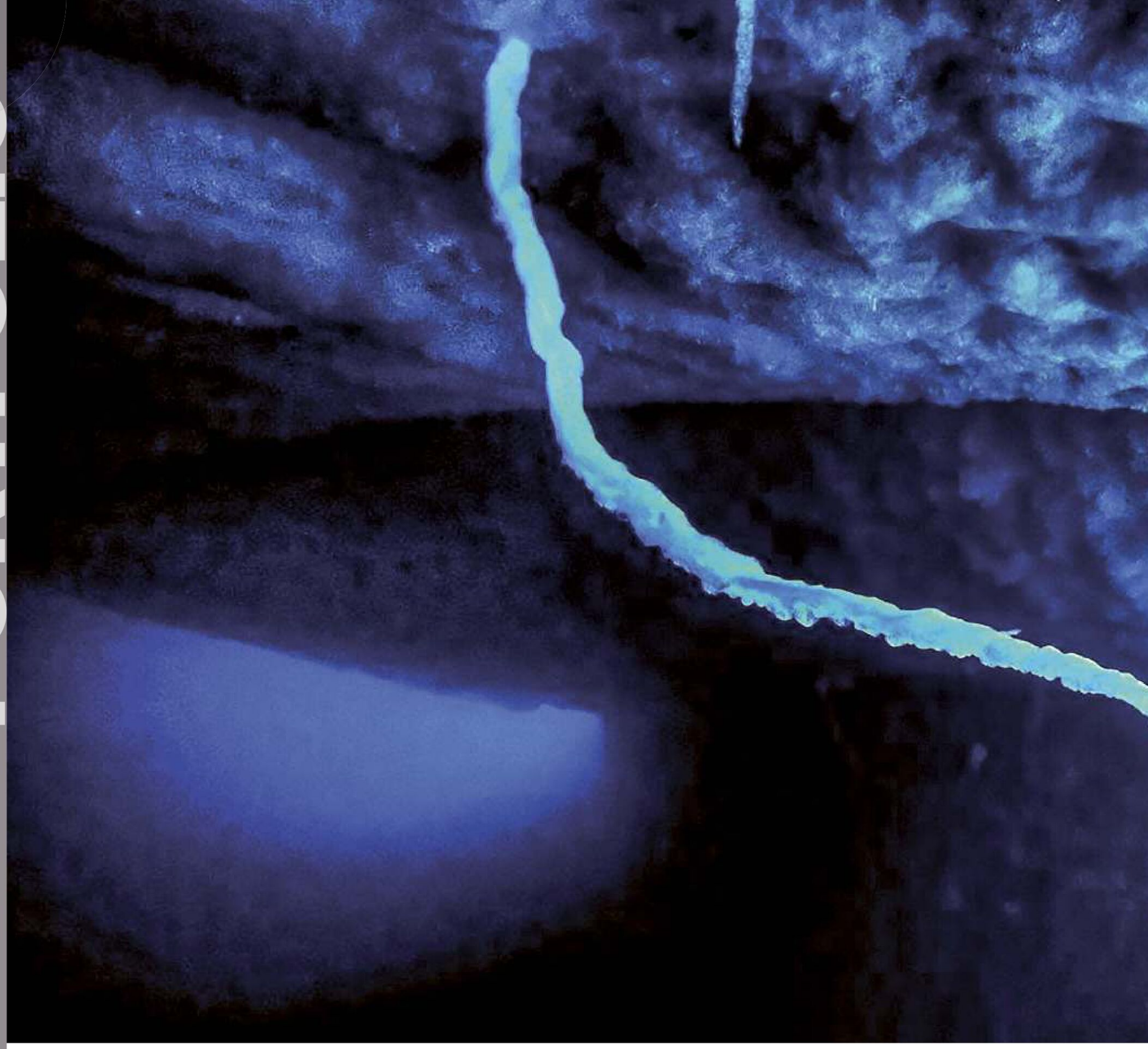
Artiste, ingénieur… et séducteur

Entre sept et neuf jours… Le temps qu'il faut au poisson-globe mâle (*Torquigener albomaculosus*) pour sculpter cette œuvre éphémère, d'une symétrie étonnante, à l'aide seulement de son corps et de ses nageoires. Après l'accouplement, la femelle viendra pondre au centre, sur le disque de sable fin. Les œufs seront ensuite fécondés puis surveillés par cet incroyable ingénieur sous-marin. Les chercheurs supposent en effet que les ondulations périphériques ralentissent la circulation d'eau au centre, évitant ainsi la dispersion des œufs. VINCENT REA

MIGRATEURS

Pour s'orienter, mieux vaut avoir du nez !

Le monde animal a la bougeotte. La majorité des espèces se déplacent de la zone où elles se reproduisent à celles où elles se nourrissent. Héritage probable d'une époque où elles ont dû s'adapter à l'alternance d'ères glaciaires et interglaciaires, selon les écologues. Les records, attestés par GPS ? Pour les airs, la sterne arctique, avec ses 70 000 kilomètres de vol entre Arctique et Antarctique. Pour les océans, la tortue luth et ses 20 000 kilomètres parcourus pour rejoindre les plages de ponte. Et sur terre, c'est le caribou et ses 1 300 kilomètres effectués en ligne droite qui remporte la palme. Mais comment se repèrent-ils ? *« Ne pas confondre orientation et navigation,* prévient Francesco Bonadonna, du Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE-CNRS) de Montpellier. *Connaître la direction à suivre est inné, affiner sa course et l'optimiser, cela s'apprend. »* Les oiseaux savent utiliser le soleil, dont le parcours constitue pour tous les êtres vivants une véritable horloge. *« Il donne la direction à suivre de façon très précise selon les saisons »,* poursuit Francesco Bonadonna. Mais la nuit ? L'étude d'étourneaux sous le faux ciel étoilé d'un planétarium montre qu'ils sont capables de se repérer sur des points fixes, telle l'étoile polaire. Les espèces nocturnes ont également développé la faculté d'utiliser l'intensité, la direction et l'inclinaison du champ magnétique terrestre. Mais celui-ci n'est pas l'outil majeur des migrateurs. C'est ce qu'a prouvé en 2015 une équipe internationale, qui a publié ses résultats dans *Scientific Reports*. *« Nous avons déplacé des puffins dorés de 400 kilomètres à l'est par rapport à leurs nids des Açores. Dans un premier groupe, les oiseaux ont été laissés à leur comportement habituel ; ceux d'un deuxième ont été équipés d'un aimant annulant la perception du champ magnétique ; dans le troisième, les puffins ont été temporairement privés d'odorat,* raconte Francesco Bonadonna, co-auteur de ce travail. *Les deux premiers groupes ont retrouvé sans encombre le chemin du nid, tandis que leurs congénères sans olfaction ont tourné en rond… jusqu'à ce qu'ils retrouvent ce sens. »* Conclusion : l'odorat est primordial. Mais à côté de l'héritage génétique, il faut aussi compter sur l'expérience qu'apporte la navigation. Les oiseaux effectuant leur première migration ne savent pas modifier leur itinéraire quand le vent, par exemple, les dévie. En revanche, les adultes, qui ont appris de leurs tribulations précédentes, peuvent corriger leur trajectoire… pour un voyage à moindre effort. LOÏC CHAUVEAU



La Terre, planète excentrique !

Au profond des abysses, dans les déserts d'Afrique et d'Amérique ou sur le plateau anatolien, la Terre produit des phénomènes curieux d'une beauté surnaturelle. Voici quelques-unes de ces extravagances, que le travail des géologues, chimistes et autres biologistes permet aujourd'hui de mieux appréhender.

LAURENT BALLESTA - GOMBESSA EXPÉDITIONS/ANDROMEDE OCÉANOLOGIE

◀ Les doigts de la mer

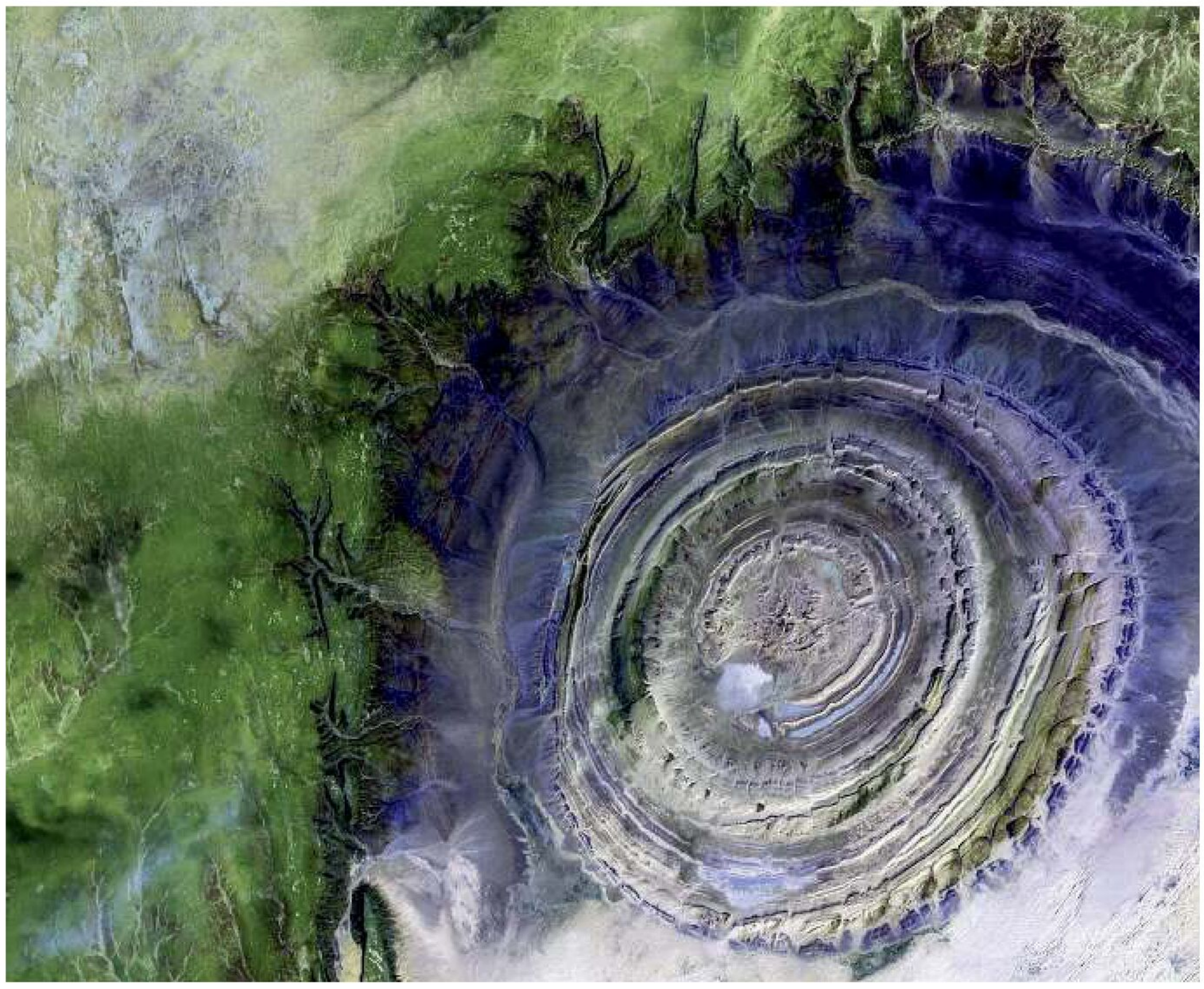
La formation de la banquise conduit parfois à l'apparition en son sein de poches d'eau très salée, qui s'écoulent vers le fond à cause de leur densité plus élevée. Leur température de congélation étant plus basse que l'eau de mer, ces écoulements gèlent l'eau environnante sur leur passage, formant ce qu'on appelle une brinicle : une stalactite de glace au cœur liquide, qui s'enfonce dans les profondeurs. Lorsqu'elle touche le fond, elle gèle les organismes croisant sa route.

PHOTO12/ALAMY/CAVAN IMAGES

◀ Pierres qui rouillent

Dans l'Utah, le sol est par endroits recouvert de milliers de billes brunes, les Moqui Marbles (du nom du peuple amérindien local), constituées d'un cœur de grès recouvert d'oxyde de fer. Plusieurs explications à cette formation sphérique sont avancées, impliquant l'action combinée d'eaux souterraines et de bactéries. De quoi expliquer pourquoi leur étude a connu un regain d'intérêt en 2004, lorsque des concrétions très similaires furent découvertes sur Mars.

TRUEBA/SPL/SUCRÉ SALÉ



WORLD HISTORY ARCHIVE/ABACA

▲ Géants de cristal

Les conditions particulières de la grotte mexicaine de Naica, située à 300 mètres de profondeur près d'une poche de magma chauffant fortement une eau riche en minéraux, ont conduit à la formation de ces cristaux de gypse, parmi les plus grands du monde : l'un d'eux dépasse les 11 mètres de long pour un poids estimé de 12 tonnes !

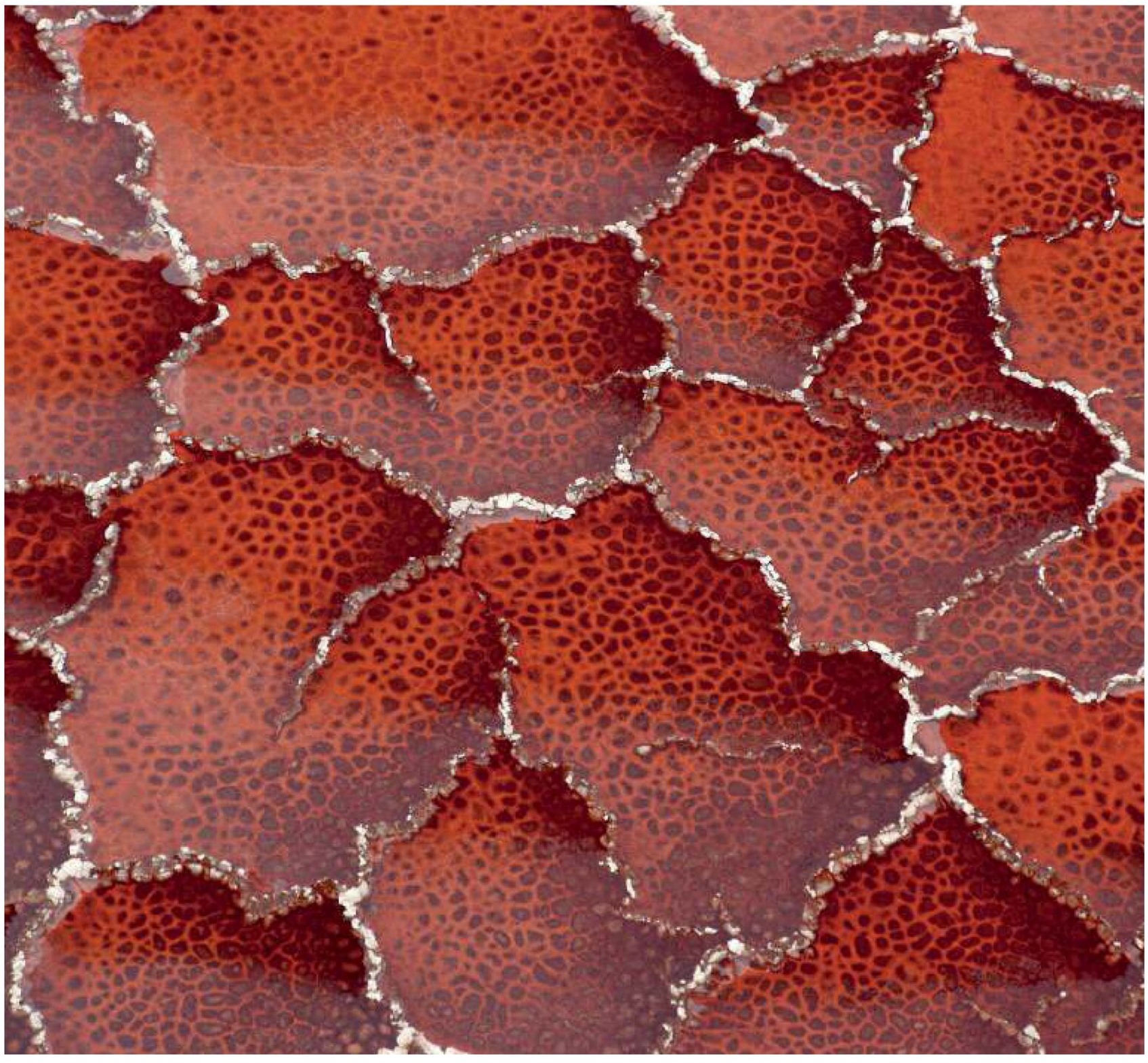
◀ Un œil sur la Terre

Surnommée « l'œil de l'Afrique », cette formation appelée structure de Richat – 50 kilomètres de diamètre – ne se révèle que vue du ciel, voire de l'espace. Perdue dans le désert mauritanien, elle ne résulterait pas de l'impact d'une météorite comme on l'a longtemps cru, mais d'une forme particulière de volcanisme survenu il y a 100 millions d'années.

▶ Capuchons de protection

En Cappadoce, au cœur du plateau anatolien (Turquie), ces étranges formations appelées cheminées de fées sont dues à la différence de résistance à l'érosion entre leur sommet basaltique, dur, et la colonne située en dessous, composée de débris volcaniques beaucoup plus friables. Ainsi protégées des pluies par leur chapeau solide, certaines colonnes peuvent atteindre jusqu'à 40 mètres de hauteur.

OZBALCI/GETTY IMAGES



CHRISTOPHE GRUAULT/ONLYWORLD.NE

◀ Des bactéries qui font voir rouge !

Aucun cours d'eau important ne s'y jette : le lac Natron, en Tanzanie, voit ses eaux renouvelées uniquement par de maigres précipitations. Soumis à une importante évaporation, il se comporte comme une saline naturelle, se chargeant en sels minéraux. Cet environnement extrême, au pH particulièrement élevé, attire des bactéries productrices d'un pigment rouge qui contraste avec les cristaux blanchâtres du lac.

BYELIKOVA OKSANA/GETTY IMAGES

OLIVIER GRUNEWALD

▲ De l'eau dont on fait les roches

Plusieurs sources de faible débit alimentent le site de Hierve El Agua, au Mexique, d'une eau saturée en minéraux et notamment en carbonate de calcium. En se solidifiant, celui-ci recouvre tout ce qu'il touche d'une gangue de pierre, formant de petits bassins que surplombent deux cascades pétrifiées.

◀ Un bleu d'enfer

Dans les zones riches en activité géothermique et volcanique, comme ici à Dallol en Éthiopie, la Terre peut parfois cracher des composés sulfurés sous forme de gaz, qui brûlent en émettant des flammes bleues. En se refroidissant, ce gaz se liquéfie et s'écoule comme de la lave, donnant au phénomène le nom – impropre – de lave bleue.

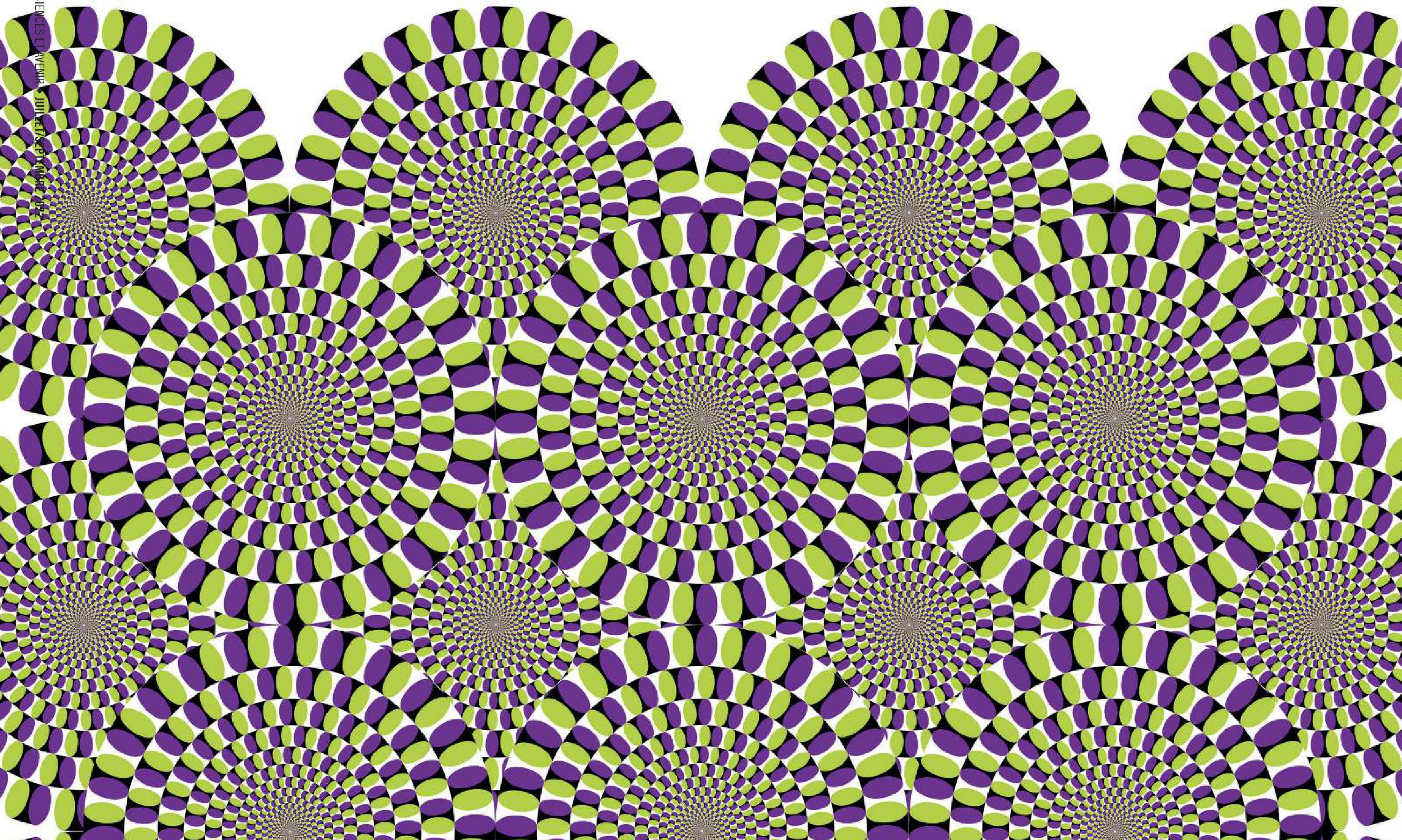
Manœuvres nocturnes dans la vallée de la Mort

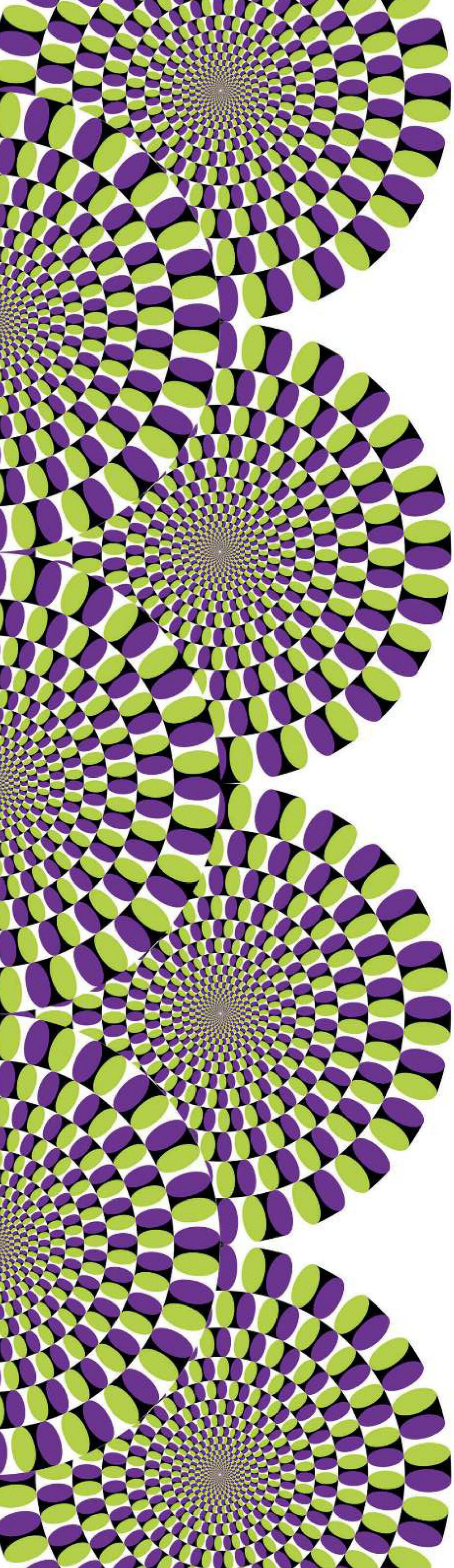
Au cœur de la vallée de la Mort, en Californie, de lourdes pierres semblent parfois se déplacer toutes seules, laissant derrière elles un long sillon de dizaines, voire centaines de mètres. Le mystère de cette mobilité a été percé en 2014 par des chercheurs qui ont observé le phénomène en direct : l'hiver, lorsque la température descend, la nuit, après qu'il a plu – événement rare dans les parages –, le sol se recouvre d'une fine couche de glace. Celle-ci se brise à la chaleur du jour, formant des plaques qui, poussées par les vents, entraînent les pierres.

CASEY COLOMB/GETTY IMAGES

NOUS LES **HUMAINS**

Quand une image statique vous entraîne dans un tourbillon... Cette illusion, dite des serpents tournants, est due au psychologue japonais Akiyoshi Kitaoka, maître en la matière.





TRENT STEEL, FROM THE ORIGINAL CONCEPT FOUND BY AKIYOSHI KITAOKA.

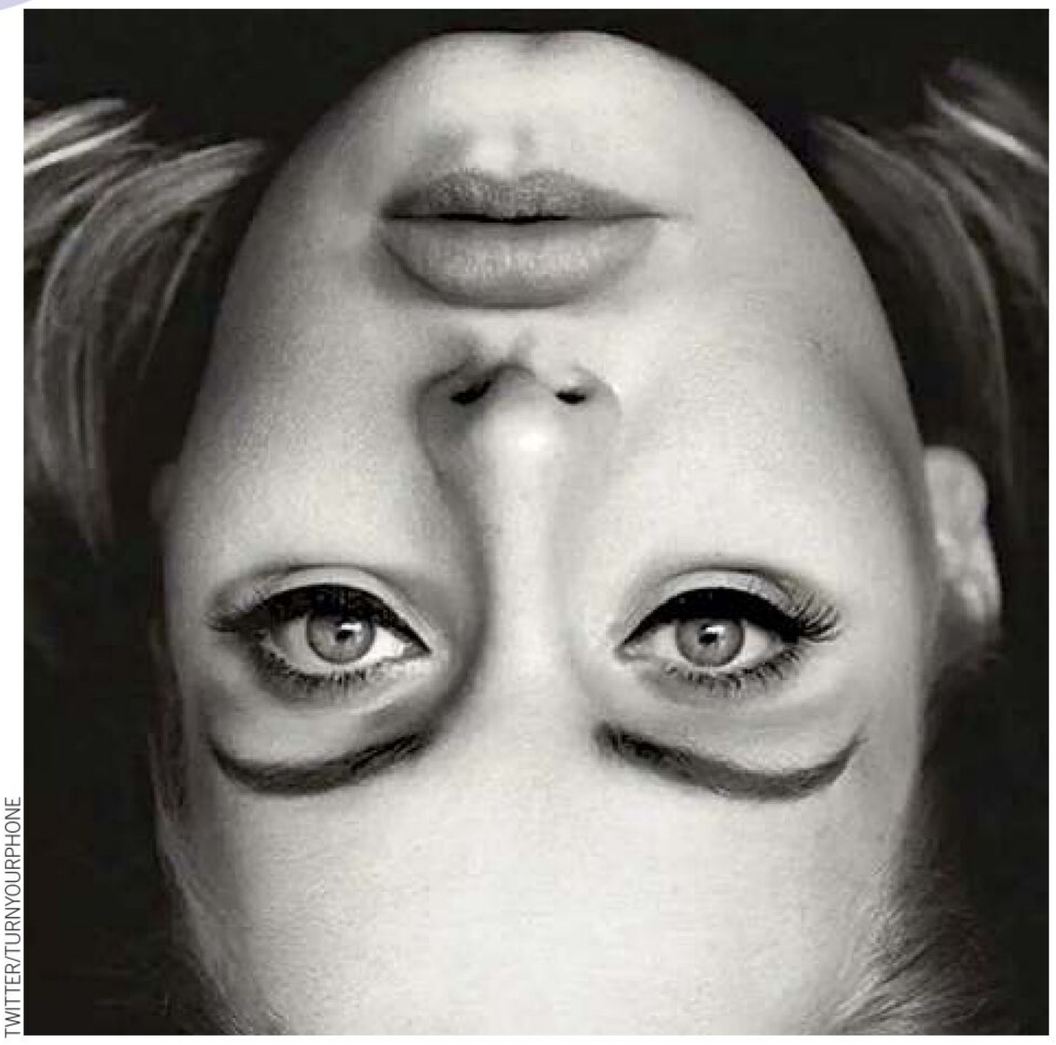
ILLUSIONS SENSORIELLES

Quand **notre cerveau** nous joue des tours

Il interprète en permanence la réalité pour lui donner du sens, quitte à transformer les informations qu'il reçoit de nos yeux ou de nos oreilles. Nul besoin de magicien pour faire vaciller la raison : le plus grand des illusionnistes, c'est lui !

Des droites qui nous semblent courbes, des serpents qui ont l'air de tourner dans une image fixe, un son qui monte éternellement dans les aigus… : la science dénombre une grande variété d'illusions, concernant tous nos sens, mais ne les explique pas toujours. Comme on dit, « ça se passe dans la tête ». Et le fonctionnement de notre système nerveux est encore loin, très loin, d'être tout à fait élucidé.

Prenons l'exemple d'une certaine robe qui a fait le tour d'Internet. *« À partir de la lumière réfléchie par un objet, notre cerveau essaie de séparer sa couleur de celle de l'éclairage,* explique Pascal Mamassian, directeur du Laboratoire des systèmes perceptifs de l'École nationale supérieure. *Il corrige les couleurs en fonction d'hypothèses sur l'éclairage. »* Si l'on perçoit la robe comme bleue et noire, c'est que l'hypothèse d'une lumière blanche l'a emporté. À l'inverse, si on la voit blanche et or, c'est que l'hypothèse d'un éclairage bleuté a pris le dessus. *« C'est une illusion persistante,* ajoute le chercheur. *Si l'on voit la robe bleue aujourd'hui, il y a des chances qu'elle nous semble encore bleue demain. Cette interprétation des couleurs résulte d'une "inférence inconsciente", un phénomène théorisé dès 1855 par le physicien et physiologiste allemand Hermann von* ◆◆◆



TWITTER/TURNYOURPHONE

Sur ce portrait inversé de la chanteuse Adèle, on ne remarque rien d'anormal. Alors qu'en retournant l'image…

ALAMY/PHOTO12.COM

La paréidolie est une illusion visuelle ou auditive qui consiste à associer un élément familier, ici un visage, à un stimulus ambigu.

◆◆◆ *Helmholtz (1821-1894) : l'expérience intervient dans la perception.* » Notre système nerveux apprend au fil du temps comment fonctionne le monde réel, et ses mécanismes d'interprétation intègrent ces acquis. L'exemple de la robe nous indique un principe qu'il faut garder à l'esprit : nos sens ne sont pas des instruments de mesure contrôlés par notre conscience. « *Ce que l'on voit, ou que l'on croit voir, c'est l'interprétation que nous livre notre système perceptif,* ajoute le chercheur. *Nous ne percevons pas l'information brute, les signaux captés par les neurones sensoriels.* » Car entre ces capteurs et notre conscience, il se passe beaucoup de choses qui lui échappent, et les occasions d'illusions sont multiples.

« *Certaines s'expliquent tout simplement par la "fatigue" de certains neurones,* explique Guillaume Masson, directeur de l'Institut des neurosciences de la Timone à Marseille. *C'est le cas de l'illusion de la chute d'eau.* » Une illusion décrite, dès le Ier siècle avant notre ère, par Lucrèce dans son fameux traité *De Natura Rerum*. « *Si, après avoir regardé quelque temps une cascade, vous déplacez ensuite votre regard sur le côté, par exemple sur une pierre, celle-ci semble bouger en sens inverse,* précise le chercheur. *On attribue ce phénomène à une diminution de l'excitabilité des neurones du système visuel spécialisés dans la détection du mouvement de haut en bas, face à un stimulus constant, un mécanisme que l'on appelle "adaptation neurale". Ce type d'illusion illustre tout simplement une limite de notre système sensoriel* »…

L. PERRINET

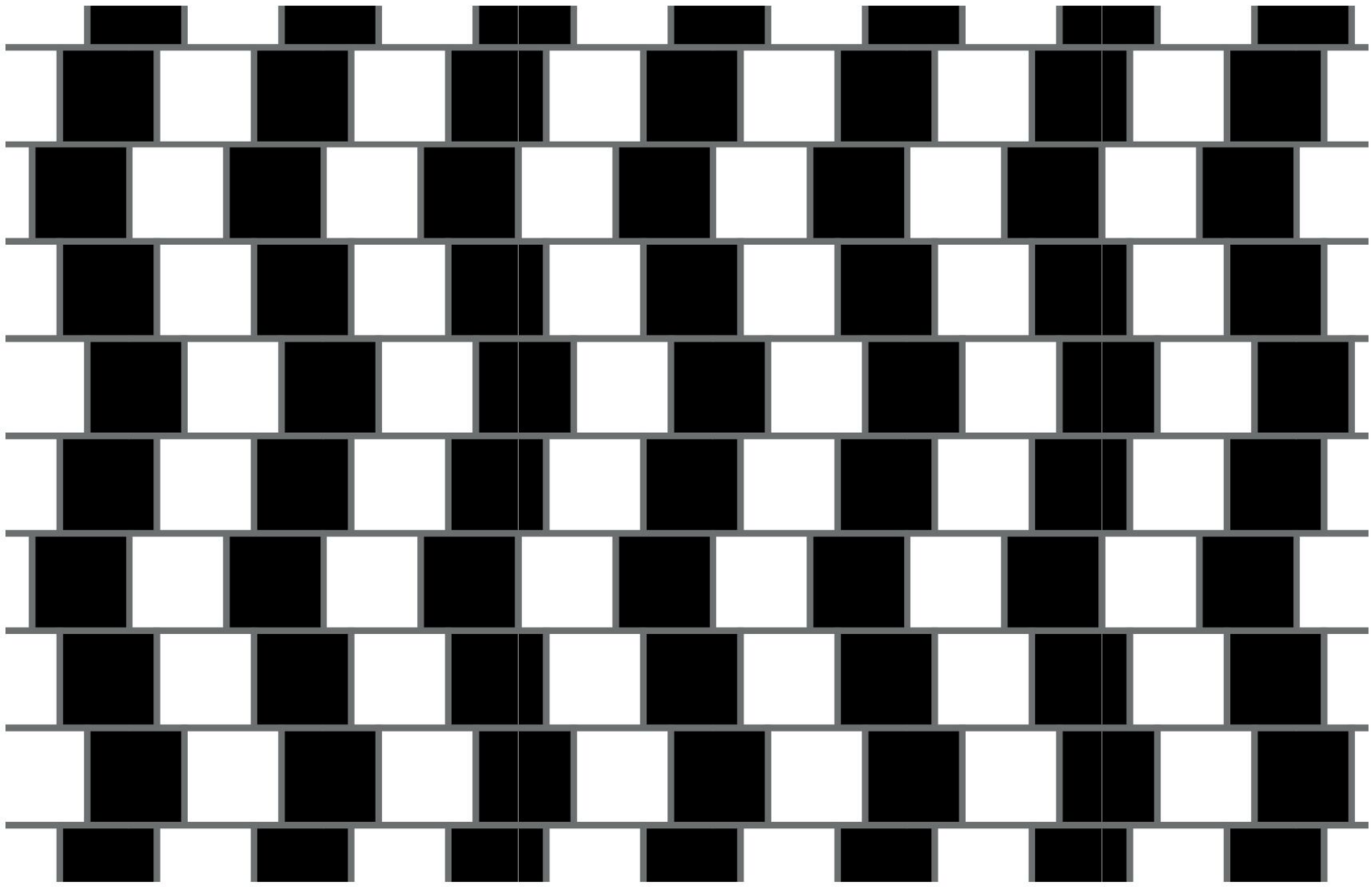
« NOTRE CERVEAU A TENDANCE À CHERCHER DU SENS DANS TOUT CE QU'IL REÇOIT, VOIT OU ENTEND »

Laurent Perrinet, chercheur à l'Institut des neurosciences de la Timone à Marseille

Comme une boisson mentholée qui nous paraît plus fraîche

Une impression de mouvement peut même être perçue face à une image fixe. Le meilleur exemple en est sans doute cette illusion dénommée Rotating Snakes (serpents tournants), que l'on doit au psychologue japonais Akiyoshi Kitaoka, auteur prolifique en matière d'illusions visuelles. Ces serpents engendrent une sensation irrépressible de mouvement à la périphérie de la zone sur laquelle on fixe le regard. On considère en général que le phénomène pourrait résulter d'une combinaison de petits mouvements incessants des yeux et d'un décalage entre les vitesses de traitement par le système sensoriel de certaines régions. En particulier, les zones à fort contraste seraient détectées plus vite que celles à faible contraste…

Certaines illusions trouvent leur explication au départ même de nos circuits sensoriels. Pourquoi les boissons contenant du menthol nous semblent-elles plus fraîches qu'elles ne le sont ? Et comment la capsaïcine contenue dans les piments induit-elle cette sensation – fallacieuse – de chaleur ? « *Cette illusion a été expliquée par deux chercheurs américains, qui ont été distingués par un prix Nobel en 2021* », signale Laurent Perrinet, chercheur à l'Ins-



WIKIMEDIA COMMONS

Dans cette illusion d'optique, dite du mur du café, toutes les lignes droites paraissent déformées alors qu'elles sont strictement parallèles. L'effet résulte de leur interaction avec les carrés noirs.

titut des neurosciences de la Timone. David Julius a découvert en 1997 que le récepteur TRPV1, présent à la surface de certains neurones sensoriels, et connu pour sa sensibilité à la capsaïcine, était également un récepteur de la chaleur. De son côté, Ardem Patapoutian a montré que le récepteur TRPM8, que l'on savait sensible au menthol, est également un récepteur du froid. Dans les deux cas, des circuits de thermosensibilité sont en quelque sorte bernés par des molécules capables d'exciter leurs récepteurs indépendamment de la température.

Les émoticônes en témoignent : il nous en faut peu pour « voir » un visage

L'illusion peut aussi résulter du caractère prédictif de notre système sensoriel. *« Notre cerveau a tendance à chercher en permanence du sens dans ce qu'il reçoit, ce qu'il voit ou entend,* explique Laurent Perrinet. *Au point qu'il peut "voir" un visage dans la photographie d'une formation montagneuse sur la Lune ou sur Mars. »* Un phénomène appelé « paréidolie ». Notons qu'il ne nous faut pas grand-chose pour voir un visage quelque part, comme en témoigne le succès des émoticônes. À propos de visages, il semble que notre mécanisme de détection… soit adepte des raccourcis. Voyez ces portraits inversés – tête en bas – de Margaret Thatcher ou d'Elon Musk que nous acceptons pour ce qu'ils prétendent être : des portraits à l'envers. Mais il suffit de retourner ces images et l'on s'aperçoit que les yeux – parfois aussi la bouche – ont été inversés et sont donc… à l'endroit. Notre système visuel, ayant trouvé deux yeux, un nez et une bouche, décide sans sourciller qu'il a vu un visage, sans se soucier de l'orientation relative de ces éléments.

Une catégorie d'illusions particulièrement spectaculaire implique non pas une, mais deux de nos modalités sensorielles. C'est le cas de l'effet McGurk-MacDonald, du nom de deux chercheurs britanniques qui, en 1976, ont placé des volontaires dans la situation d'entendre une personne tout en la voyant parler à l'écran, et ont diffusé des signaux contradictoires. Lorsqu'ils leur ont demandé ce que la personne avait dit, ils ont obtenu des résultats étranges : lorsque les volontaires écoutaient un « ba » tout en voyant la bouche de la personne former un « ga », ils affirmaient avoir entendu… un « da ». L'effet observé sur des syllabes isolées se reproduisant sur des mots et même des phrases entières. *« C'est une illusion qui marche à tous les coups, ce qui est rare,* assure Pascal Mamassian. *Face à un conflit entre audition et vision, notre système nerveux doit trancher. »* Quelque part dans notre cerveau, un mécanisme coupe la poire en deux. Nous ne percevons que le résultat de cette décision : les conditions de ce compromis nous sont épargnées.

On retrouve une confrontation entre modalités sensorielles dans l'illusion « taille- ◆◆◆

SLATE

La robe qui a suscité nombre de questionnements et de réactions sur Internet : est-elle bleue et noire, blanche et or, ou bleu ciel et bronze ?

◆◆◆ poids » ou illusion de Charpentier (d'après le physicien français Augustin Charpentier qui l'a décrite en 1891). Dans sa version la plus simple, un volontaire est confronté à deux objets semblables, par exemple deux boîtes, de volume clairement différent mais de même poids. Sommé de les soupeser et de dire lequel est le plus lourd, il désigne presque à coup sûr le plus petit. Cette impression perdure après démonstration, balance à l'appui. *« Cette illusion, que l'on n'observe pas chez le petit enfant sans expérience, repose sur le fait que nous avons appris à anticiper l'effort à fournir pour porter un objet et que nous l'évaluons inconsciemment à partir de son volume,* explique Vincent Hayward, professeur à Sorbonne Université. *Dans l'expérience, on surévalue, avant de le saisir, le poids du plus gros objet, qui de ce fait paraît plus léger. Un jour que je présentais cette illusion en public, un boulanger est venu me remercier, expliquant que toute sa vie, il s'était demandé pourquoi sa pâte à pain lui semblait plus légère une fois levée… »*

INRIA/G. SCAGNELLI

« CES IMPERFECTIONS DE NOTRE SYSTÈME NERVEUX ONT PERMIS LA SURVIE DE NOTRE ESPÈCE »

Vincent Hayward, professeur à Sorbonne Université

Conclusion de tous ces phénomènes étranges ? *« Nos sens ne sont pas des instruments de physique,* résume Vincent Hayward. *Toute notre machinerie sensorielle fait plutôt du bon travail, en général. À partir de peu d'indices, elle reconstruit une représentation du monde tout à fait correcte. Mais parfois, le résultat est surprenant pour notre conscience… »* C'est étrange, mais est-ce grave ? *« Non seulement ces illusions n'ont guère de conséquences néfastes, mais on peut même pousser l'argument plus loin,* insiste le chercheur. *Ces imperfections de notre système nerveux, qui sont la contrepartie de son efficacité, ont été sélectionnées par l'évolution : elles ont permis la survie de notre espèce ! »* La vie retient les innovations favorisant l'adaptation, avec leurs petits défauts.

PIERRE VANDEGINSTE

HYPERMNÉSIE

Une mémoire sans limites

La capacité spectaculaire qu'ont certaines personnes à se souvenir de tout dans les moindres détails peut s'avérer difficile à vivre.

Solomon Cherechevski est dans les années 1920 un jeune journaliste russe. Son rédacteur en chef remarque qu'il ne prend jamais de note, mais n'oublie jamais rien. Il le met alors en contact avec un neuropsychologue renommé, Alexandre Luria, qui constate que l'homme est capable de mémoriser des listes de soixante-dix mots et les restituer sans faute quelques heures… ou quelques années plus tard*. Son hypermnésie s'appuie sur une remarquable synesthésie *(lire aussi p.60)*.

Née à New York, Jill Price a déménagé à Los Angeles à l'âge de huit ans : *« Mon cerveau s'est alors cassé »*, résume-t-elle. Elle prend l'habitude de noter et mémoriser tout ce qu'elle peut de son passé regretté… puis de son nouveau quotidien. Un jour de l'an 2000, elle appelle à l'aide le neurobiologiste James McGaugh, qui dirige un centre de recherche sur la mémoire à l'université de Californie à Irvine. En 2005, il publie un article décrivant le « cas AJ ». *« Sa mémoire est incontrôlable et automatique. […] Si on lui donne une date, elle peut vous dire ce qu'elle faisait, et quel jour de la semaine cela tombait. »* Le chercheur observera d'autres patients incapables d'oublier, et notera chez eux une tendance obsessionnelle à se repasser le film de leur vie. Leur HSAM (Highly Superior Autobiographical Memory) est un fardeau plutôt qu'un don. D'autres types d'hypermnésie ont été décrits, comme la mémoire photographique (ou « éidétique ») du Britannique Stephen Wiltshire, qui dessine des panoramas ultraprécis de grandes villes telles que New York, Mexico ou Londres après un survol en hélicoptère. Il a été diagnostiqué autiste, à l'instar de nombreux hypermnésiques. Le cas de Kim Peek (1951-2009), qui a inspiré le film *Rain Man*, est encore plus étrange. Alors que les deux hémisphères de son cerveau n'étaient pas connectés, il pouvait réciter à la demande l'un des 12 000 livres qu'il avait lus. Quant à l'Indien Suresh Kumar Sharma, il a énuméré en 2015, les 70 030 premières décimales de pi… Et rappelons que Mozart aurait, à quatorze ans, retranscrit la partition du *Miserere* du musicien du XVII^e^ siècle Gregorio Allegri, après l'avoir entendu une unique fois. Les mémoires extrêmes sont variées… et restent inexpliquées.

P. V.

* Alexandre Luria, *L'Homme dont le monde volait en éclats*, Seuil, 1995.

PSYCHOLOGIE

« Notre perception du temps varie avec nos émotions »

Le sentiment du temps qui passe ne dépend pas directement de l'âge, souligne la psychologue, mais de multiples facteurs, au premier rang desquels notre état émotionnel et notre activité.

Il semblerait que la vitesse du temps varie avec l'âge…

« Plus je vieillis, plus le temps passe vite ! » Qui n'a pas entendu ce type de déclaration ? Mais est-ce une réalité ? Nous avons voulu comprendre scientifiquement ce sentiment. Nous avons interrogé par téléphone – huit fois par jour pendant cinq jours – des étudiants d'environ 20 ans et des personnes âgées d'environ 70 ans. La première question était : « Au moment où je vous appelle, à quelle vitesse le temps passe-t-il pour vous ? » À chaque fois, nous les questionnions aussi sur leur état émotionnel et leurs activités. Il s'avère qu'il n'y a pas de différence significative entre les réponses des uns et des autres. Ainsi, quel que soit l'âge, le sentiment de passage du temps est le même. Nous en avons déduit finalement que dans la vie quotidienne, au présent, le temps ne passe pas plus vite lorsqu'on prend de l'âge.

JULIEN BOURGEOIS

SYLVIE DROIT-VOLET

Professeure en psychologie sociale et cognitive à l'université Clermont-Auvergne

Nombre de personnes âgées se désolent pourtant de « ces journées qui n'en finissent pas »…

Effectivement, un octogénaire qui déplore un passage trop rapide du temps pourra se plaindre aussitôt après que les journées sont longues. C'est le « paradoxe temporel des grands-mères ». Un problème d'attention ? De mémoire ? De ralentissement de l'horloge interne ? L'expérience démontre que les émotions et le fait d'être occupé influencent notre expérience subjective du passage du temps. Si je suis triste, que je m'ennuie, alors j'exprime que le temps passe lentement.
Le sentiment d'accélération ou de ralentissement du temps dépend donc avant tout des émotions et des activités, et non de l'âge.

Notre horloge interne, connectée au rythme circadien, est-elle aussi fiable qu'un instrument de mesure ?

Notre cerveau est un expert du traitement des durées. Même les bébés savent estimer le temps. À un feu rouge, on sait exactement si l'on a le temps de traverser. Cependant, notre capacité naturelle à apprécier la durée peut être affectée par des facteurs perturbateurs comme la colère ou la peur. En situation de menace, notre cerveau est en état d'éveil maximal. Tout notre corps est en état d'alerte, prêt à fuir. Le temps semble alors s'accélérer… et notre temps d'action raccourcir. Alors que la durée de l'exposition à la menace sera jugée plus longue. On assiste à une déformation du temps, un allongement subjectif.
Notre aptitude à estimer la durée est également altérée par la difficulté à réaliser une tâche. Dans l'expérience dite de la double tâche, des sujets doivent évaluer la durée d'apparition d'un rond bleu sur un écran. Puis de ce même rond dans lequel on insère des points de couleur. Bien que les deux séquences aient une durée rigoureusement identique, la seconde aura semblé plus courte. L'apparition des points a détourné l'attention du processus de mesure du temps.
« Remplir le temps » permet ainsi d'échapper à la sensation de durée. Quel parent n'a pas fait jouer son enfant dans une salle d'attente pour tromper son attention et lui donner l'impression que le temps passe plus vite ? Ne pas penser au temps le rend moins saillant. Un conseil : ne jamais regarder l'heure lorsque l'on a une insomnie !

PROPOS RECUEILLIS PAR VALÉRIE HANDWEILER

SYNESTHÉSIE

Écoutez les couleurs !

Êtes-vous né(e) un jour bleu ou un jour rouge ? Si la réponse vous semble évidente, c'est que vous êtes sans doute synesthète.

Dans son autobiographie, Vladimir Nabokov écrit qu'il a *« une ouïe colorée »*. Il évoque avec poésie les teintes que prennent les lettres de l'alphabet : *« Les [lettres] jaunes comprennent divers e et i, un d crémeux, un y doré et un u, dont je ne peux exprimer la valeur alphabétique que par "cuivré avec un éclat d'olive". »* L'être humain, généralement, sépare strictement les sensations procurées par ses cinq sens. Mais si, à l'instar de l'écrivain américain, vous voyez des couleurs à l'évocation d'une lettre ou à l'écoute d'un son, vous êtes probablement synesthète… comme 3 % – au moins – de la population.

Pour le synesthète, spontanément, une information sensorielle s'associe à, ou déclenche, une perception sensorielle d'un autre ordre. Deux sens, trois, voire plus, peuvent être impliqués. Les synesthésies les plus courantes sont liées au langage (lettres, mots, chiffres, quantités, symboles et divisions de temps). La synesthésie graphème-couleur associe ainsi une couleur à chaque chiffre, lettre ou jour de la semaine. *« Je suis né un jour bleu »*, affirme l'écrivain britannique Daniel Tammet. Certains vont jusqu'à les personnifier, leur attribuant de manière spontanée un caractère, une humeur. Si le 5 peut ainsi apparaître systématiquement rouge pour un individu, il évoquera pour un autre un personnage triste. Certains synesthètes associent formes, couleurs ou textures à un son, une musique. D'autres se représentent des listes dans un schéma spatial donné. Ils voient par exemple s'organiser sur une ligne ascendante, bifurquer à 90 degrés puis redescendre brusquement les jours de la semaine, le système des castes indien ou… les pointures de chaussures !

Mais que se passe-t-il dans le cerveau d'un synesthète ? Deux hypothèses sont avancées : une moindre inhibition de messages électrochimiques entre neurones appartenant à des aires corticales différentes, ou un surcroît de connexions neuronales entre deux régions du cortex cérébral. Avec, dans les deux cas, une prédisposition génétique, car l'on constate des « clusters » familiaux. L'environnement et la culture auraient également un impact sur ces associations sensorielles et cognitives. Une autre proposition, qui concerne plus spécifiquement les synesthètes graphème-couleur, serait liée au développement du cerveau. Selon Jean-Michel Hupé, chercheur au Centre de recherche cerveau et cognition de Toulouse, ces synesthésies seraient liées à *« des vestiges de l'imaginaire enfantin. Toutes ces associations remontent à l'enfance, à un âge où le cerveau est confronté à l'apprentissage de la lecture et de l'écriture »*. L'acquisition de la lecture requiert en effet des parties du cerveau dévolues à la perception des couleurs. Dans le cas des synesthètes, le recyclage de ces zones ne s'est pas effectué comme chez la majorité de la population : ainsi se forme ce que Jean-Michel Hupé appelle *« un palimpseste neuronal »*. Selon le chercheur italien Roberto Bottini, entre 80 et 97 % des synesthésies requièrent la vue des couleurs. Pour autant, ces stimulations visuelles ne sont pas un prérequis : en témoigne le cas, qu'il a présenté en mai dernier, d'un homme pour lequel les nombres ou les mois de l'année ont une texture et s'agencent dans l'espace alors qu'il est… aveugle de naissance.

ASTRID SAINT AUGUSTE

« CES ASSOCIATIONS REMONTENT À L'ENFANCE, LORSQUE LE CERVEAU EST CONFRONTÉ À L'APPRENTISSAGE DE LA LECTURE ET DE L'ÉCRITURE »

Jean-Michel Hupé, chercheur au Centre de recherche cerveau et cognition de Toulouse

Phénomène non pathologique, la synesthésie toucherait 3 % de la population.

GETTY IMAGES

COUPEURS DE FEU

L'essentiel, c'est d'y croire

Coupeur de feu, barreur, souffleur, faiseur de secrets… Sans prétention à se substituer aux médecins, ces guérisseurs qui portent bien des noms sont consultés par des centaines de milliers de personnes pour soulager brûlures, zonas ou inflammation due aux radiothérapies, par imposition des mains, voire coups de téléphone. Ils évoquent un « don » ou un « fluide ». *« Généralement, l'intensité de la douleur baisse rapidement*, rapporte Christophe Limayrac, thérapeute énergétique. *Les personnes se sentent plus détendues. »* L'engouement est grandissant, mais qu'en dit la médecine cartésienne ? *« Le recours à ces pratiques n'est pas délétère*, admet Nicolas Magné, oncologue-radiothérapeute à Foix, *mais sur le plan strictement scientifique, on ne peut pas dire qu'elles apportent un bénéfice. »* D'après son étude menée en 2017 auprès de 500 patients ayant surmonté un cancer, le taux d'effets secondaires induits par la radiothérapie était le même, que les sondés aient recours ou non à un coupeur de feu. Plus de 80 % des patients rapportent toutefois un « bon » ou « très bon » impact du guérisseur. Croire en sa guérison y serait pour beaucoup. *« Je dis à mes patients : "Si vous pensez que ça peut vous apporter quelque chose, faites-le !"*, explique Nicolas Magné. *L'humain a besoin d'une médecine personnalisée. Ces guérisseurs sont des oreilles attentives qui écoutent les souffrances, ce que le corps médical ne fait plus, faute de temps… »* **LAUREEN BOUYSSOU**

PQR/MAXPPP

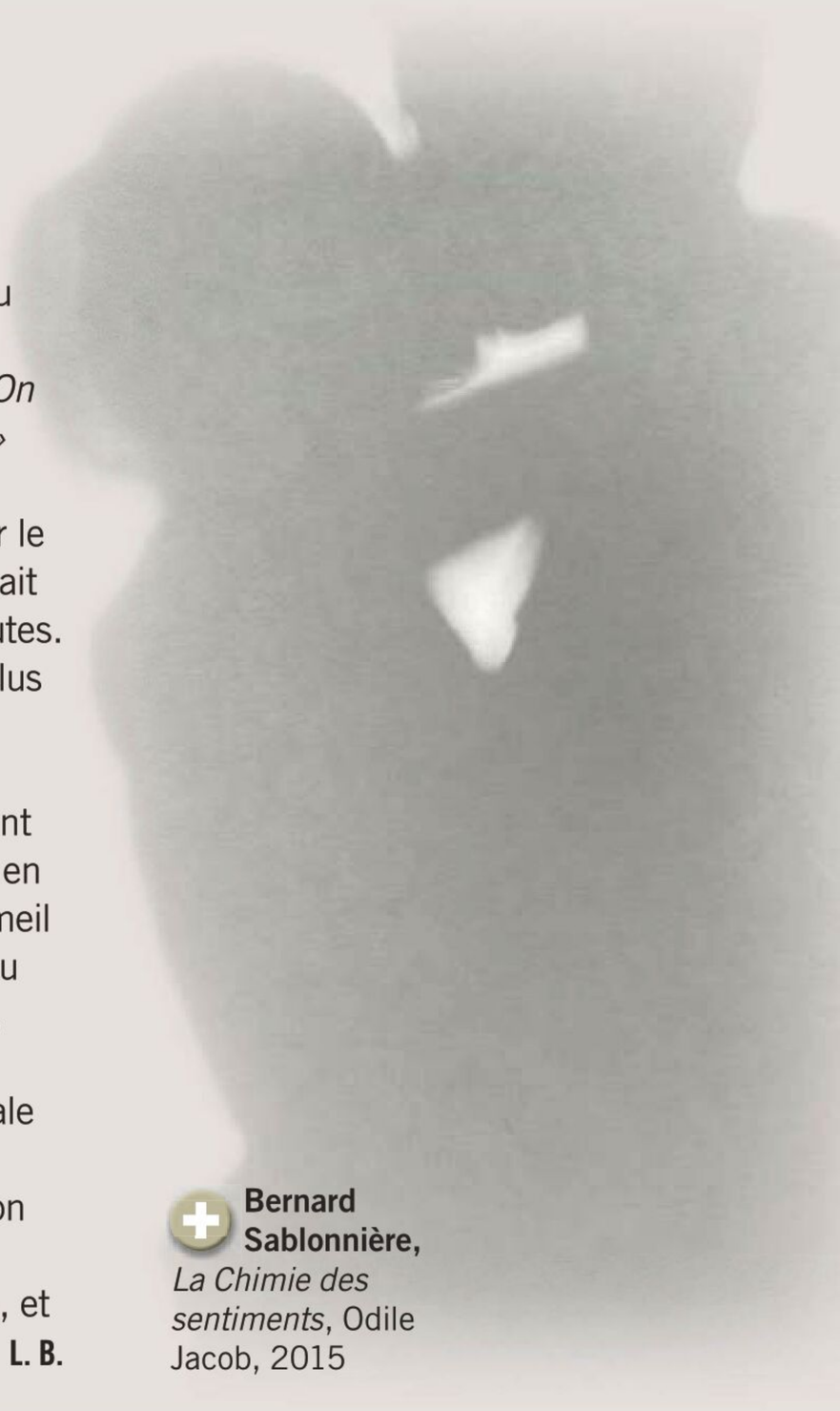
« ILS SONT DES OREILLES ATTENTIVES QUI ÉCOUTENT LES SOUFFRANCES DES PATIENTS, CE QUE LE CORPS MÉDICAL NE FAIT PLUS, FAUTE DE TEMPS… »

Nicolas Magné, oncologue-radiothérapeute au centre hospitalier intercommunal des Vallées de l'Ariège, à Foix

COUP DE FOUDRE

La chimie du désir

Tout s'efface de votre champ de conscience hormis le visage que vous regardez. C'est le coup de foudre, un désir subit et violent ! Mais si les battements s'accélèrent dans votre poitrine, l'amour n'a pas grand-chose à voir avec le cœur. *« Le coup de foudre est une réaction purement cérébrale »*, assure Bernard Sablonnière, professeur de biochimie et chercheur à l'Inserm. Les coupables de cette alchimie instantanée ? Dopamine, endorphine et adrénaline ! *« Les signaux que l'on reçoit de l'autre activent immédiatement le système limbique – ou "cerveau des émotions" – en stimulant le circuit du désir,* explique-t-il. *Celui-ci libère un neurotransmetteur, "clé" chimique de l'envie : la dopamine. L'effet est le même que celui provoqué par une drogue ! En réponse à la dopamine, ce circuit active en effet la libération d'hormones du plaisir – les endorphines – et réduit le stress. »* Dans le même temps, l'amygdale a fonctionné comme un système d'alerte en déclenchant la libération d'une autre hormone, l'adrénaline. Celle-ci a provoqué un stress intense, à l'origine du feu aux joues, des frissons ou des jambes flageolantes, et activé toutes nos perceptions sensorielles, provoquant de nombreuses émotions comme la joie ou la peur. *« Percer l'intimité de l'autre, c'est prendre un risque*, souligne le chercheur. *On se demande : "J'y vais ou je n'y vais pas ?"* Mais le désir est plus fort, et la dopamine ordonne au cerveau de foncer pour obtenir le plaisir attendu ! Un processus qui se jouerait en quelques fractions de seconde ou minutes. Les troubles compulsifs du type « je n'ai plus faim », « je le/la bombarde de messages » s'expliquent aussi par ces va-et-vient hormonaux continuels. Par ailleurs, pendant quelques semaines, le lobe frontal – situé en avant du système limbique – met en sommeil notre jugement. Mais le désir s'émousse au bout de deux ou trois ans, le plus souvent. La routine s'installe. Le cerveau aurait en fait évolué pour que la forte attirance initiale tienne… le temps de concevoir un enfant. Question de survie de l'espèce. Reste qu'on ignore toujours pourquoi une personne va expérimenter un ou des coup(s) de foudre, et pas une autre. **L. B.**



GETTY IMAGES

Bernard Sablonnière, *La Chimie des sentiments*, Odile Jacob, 2015

ROBOTIQUE

Troublantes rencontres dans la vallée de l'étrange

Au dernier CES (Consumer Electronic Show), le salon mondial du numérique qui s'est tenu à Las Vegas du 5 au 7 janvier 2022, la vedette était un robot humanoïde nommé Ameca. Mouvements des bras, visage expressif, conversation nourrie à l'intelligence artificielle… On le prendrait presque pour un humain. Quelques années plus tôt, déjà, le roboticien japonais Hiroshi Ishiguro avait créé l'événement en présentant son « double » quasi-parfait. Dans un cas comme dans l'autre, pourtant, un je-ne-sais-quoi semble clocher. Face à un objet – robot, poupée ou prothèse – plus ou moins anthropomorphe, on peut en effet ressentir un certain malaise. *« Quelque chose nous dit de façon troublante que ce n'est pas un humain »*, résume Bertrand Tondu, chercheur en robotique au Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (Laas-CNRS) à Toulouse.

Une dissonance cognitive connue sous le nom de « vallée de l'étrange », théorisée par le Japonais Masahiro Mori dans les années 1970, bien avant les premières créations humanoïdes. Il a représenté le phénomène sous la forme d'une courbe : plus un robot est réaliste, plus notre « sympathie » à son égard augmente… jusqu'à un certain degré de ressemblance. La courbe s'effondre alors brutalement : nous entrons dans « la vallée de l'étrange ». *« Selon Mori, nous pouvons éprouver la même répulsion que face à un cadavre – si le robot humanoïde ne bouge pas – ou à un zombie, s'il est en mouvement »*, précise le chercheur. La courbe de sympathie remonte ensuite jusqu'à atteindre son maximum face à un hypothétique robot qui serait identique en tout point à un être humain. Quelle est la cause de ce phénomène surprenant ? *« Cela pourrait être un possible trait évolutif lié à la survie de l'espèce. Savoir reconnaître ses semblables dans les moindres détails permet d'éviter certains dangers… »*, avance Bertrand Tondu.

L'article de Masahiro Mori (en anglais) : sciav.fr/valleedeletrange

La « vallée de l'étrange » n'est cependant pas le principal problème des chercheurs en robotique humanoïde : c'est avant tout la marche, qui doit être stable, non saccadée et sans risque de chute, et la reproduction de la main humaine, très complexe. *« En dehors de quelques réalisations à visée publicitaire, l'hyperréalisme n'est plus vraiment d'actualité, notamment pour les robots humanoïdes consacrés à l'assistance aux personnes »*, conclut Bertrand Tondu… qui souligne que les robots considérés comme les plus sympathiques sont R2D2 et C-3PO, de *Star Wars*.

JEAN-FRANÇOIS HAÏT

L'humanoïde Ameca présente des expressions du visage et des mouvements du corps déconcertants de réalisme.

DANIEL KARMANN/GETTY IMAGES

HÉMINÉGLIGENCE

Comme si la gauche n'existait pas…

GETTY IMAGES

C'est l'une des conséquences les plus spectaculaires d'une lésion cérébrale. Chaque année, des dizaines de milliers de Français victimes d'un AVC, d'une tumeur ou d'un traumatisme crânien perdent soudain conscience de tout ce qui se situe – le plus souvent – à leur gauche. Demandez-leur de dessiner un visage, il en manquera très probablement la moitié. De se raser ou se maquiller, beaucoup ne s'exécuteront que pour le côté droit. À table, ils risquent d'ignorer tout ce qui, dans leur assiette, se trouve à gauche. *« Ce n'est pas un problème de vision, mais bien de traitement de l'information par le cerveau*, explique Éric Siéroff, neuropsychologue, spécialiste de ce trouble appelé négligence spatiale unilatérale (NSU) ou héminégligence. *Bien souvent, ils n'ont même pas conscience du problème. Lorsqu'on demande à un patient de tendre sa main gauche, il peut répondre : "c'est fait" alors qu'il n'a même pas bougé. »* Que se passe-t-il donc dans la tête de ces patients ? Selon différentes hypothèses, les lésions toucheraient des zones impliquées dans l'attention, la représentation spatiale ou le traitement de l'information. Lorsque celles-ci se situent dans l'hémisphère cérébral droit, qui commande la partie gauche du corps, tout ce qui se situe à gauche de la personne ne semble plus avoir d'existence. *« On a longtemps pensé que les négligences spatiales unilatérales droites, causées par des lésions de l'hémisphère gauche, étaient très rares. Mais la littérature scientifique sur le sujet commence à évoluer*, reprend Éric Siéroff. *En réalité, les lésions cérébrales gauches provoquent bien souvent d'autres troubles graves, notamment du langage, ce qui rend l'héminégligence difficile à diagnostiquer. »* Gauche ou droite, solliciter constamment la partie négligée, par exemple en se plaçant systématiquement du « mauvais » côté avant d'engager la conversation avec les personnes touchées, permet à ces dernières d'élargir peu à peu leur perception du monde, jusqu'à parfois retrouver une vie quasi normale. **YANN CHAVANCE**

EFFET NOCEBO

Des malades pas vraiment imaginaires

Avant d'introduire l'aiguille dans la peau, l'infirmière annonce souvent « une petite piqûre ». Il y a fort à parier que si elle plissait les yeux et, bouche déformée, vous prévenait d'une possible douleur, vous auriez très, très mal… C'est l'effet nocebo, induit dans ce cas par le discours peu rassurant de l'infirmière. Une sorte de miroir du placebo. Quand celui-ci minore les symptômes de la maladie, celui-là a des incidences délétères qui n'ont pas lieu d'être. Ces effets indésirables, le plus souvent des maux de tête, de ventre ou de la fatigue, ne s'expliquent pas par la composition du médicament, qui ne contient pas de substance susceptible de les causer. *« Pour autant, ils ne sont absolument pas imaginaires*, prévient Mathieu Molimard, chef du service de pharmacologie médicale du CHU de Bordeaux. *Ils sont véritablement ressentis par les patients, mais leur origine est psychologique ou physiologique. Autrement dit, on peut observer des modifications cérébrales ou neurobiologiques réelles, par exemple une augmentation de la sécrétion de cholécystokinine, une hormone impliquée dans la perception de la douleur. »* Comment expliquer l'effet nocebo ? Les chercheurs n'ont pas encore fait le tour de ce phénomène complexe. En simplifiant, on pourrait dire que de la même façon que l'effet placebo repose sur la conviction que le médicament va apporter un bénéfice, l'effet nocebo provient d'une crainte surdimensionnée des effets indésirables. « *Les personnes anxieuses et pessimistes sont plus à même de souffrir d'effet nocebo, surtout en période de stress* », explique Mathieu Molimard. Mais cette anxiété peut aussi survenir chez tout un chacun à la lecture d'une notice de médicament ou lors d'une visite médicale. *« La manière de prescrire est presque aussi importante que ce que l'on prescrit »,* résume Mathieu Molimard, qui souligne que présenter les bénéfices et les risques d'un traitement est un exercice subtil. L'efficacité du médicament repose d'ailleurs aussi sur l'image qu'en ont médecin et patient. Pour preuve, on constate davantage d'effets secondaires avec les génériques. Selon les scientifiques, ce qui est alors en cause, c'est l'image dégradée d'un médicament bon marché. Et rien de plus. **MARINE CYGLER**

PQR/MAXPPP

« ON PEUT OBSERVER DES MODIFICATIONS BIEN RÉELLES, PAR EXEMPLE UNE AUGMENTATION DE LA SÉCRÉTION DE L'HORMONE IMPLIQUÉE DANS LA PERCEPTION DE LA DOULEUR »

Mathieu Molimard, chef du service de pharmacologie médicale du CHU de Bordeaux

PARAPSYCHOLOGIE

Des croyances surnaturelles

Parler avec ses morts, se livrer à des pratiques divinatoires, observer les ovnis… Un Français sur trois croit aux esprits, un sur quatre a vécu une expérience paranormale. Le monde serait-il plus étrange qu'il n'y paraît ?

GETTY IMAGES

Les phénomènes paranormaux seraient-ils un moyen de réenchanter une existence que n'irrigue plus le sentiment religieux ? Lorsque l'on frissonne au sujet des esprits frappeurs, que l'on s'adonne à la divination ou que l'on observe les ovnis, la vie spirituelle s'émancipe du cadre bien réglé d'une rationalité qui n'apaise pas les angoisses. L'incrédule porte un regard désabusé sur ces manifestations : une description courageuse de l'existence se passe des entités surnaturelles ! Mais selon le psychiatre Patrick Clervoy, les phénomènes paranormaux ne sont pas marginaux : *« Ils font partie de ce avec quoi nous pensons le quotidien. »* De fait, une étude Yougov réalisée en 2019 révèle qu'un tiers des Français croient aux esprits et qu'un quart ont vécu une expérience paranormale. Inutile de nier ces phénomènes, assure Patrick Clervoy : *« Toutes les cultures et les civilisations ont essayé de les comprendre. Nous percevons la présence de nos défunts, cela est vieux comme le monde ! »* Une piste pour cette compréhension : identifier ce que ces phénomènes mobilisent tant au niveau de la psyché que du corps et de la vie de groupe.

Pour Freud, le « fantôme » du défunt s'apparentait à une psychose hallucinatoire du désir, un déni de la perte.

Une silhouette humaine ou un jeu d'ombres

Les sociétés humaines ont toujours gardé un lien avec les morts. Nous refusons de voir dans le corps gisant la fin de toute existence. Le souvenir de nos défunts entretient l'idée d'une forme de vie *post mortem*, et peut occasionner de troublantes reviviscences, portées par un moment d'intense émotion ou d'angoisse. Notre personnalité, dans ses dimensions affective et intellectuelle, est parfois si imprégnée du rapport avec le défunt que surviennent des bouffées hallucinatoires lors desquelles nous perdons le contact avec la réalité : nous percevons le défunt. Freud comprenait ainsi le fantôme comme une psychose hallucinatoire du désir, un déni de la perte. Selon Patrick Clervoy, *« ces manifestations sont parfois bénéfiques »*, car elles apaisent l'endeuillé.

Mais les signaux venus des morts peuvent aussi être oppressants : c'est le phénomène de la hantise. Comment l'expliquer ? Au niveau cognitif, le cerveau n'a de cesse de créer du sens en assimilant des perceptions à des formes familières. Ce processus, baptisé paréidolie, vous fera percevoir une voix ou une silhouette humaine à partir d'un bruit ou d'un simple jeu d'ombres. Les états de conscience survenant à l'en-

NOUS REFUSONS DE VOIR DANS LA MORT LA FIN DE TOUTE EXISTENCE : LE SOUVENIR DES ÊTRES AIMÉS ENTRETIENT L'IDÉE D'UNE FORME DE VIE POST MORTEM OCCASIONNANT DES REVIVISCENCES TROUBLANTES

dormissement (dits hypnagogiques) et au réveil (hypnopompiques) sont également propices aux manifestations étranges.

Selon une étude britannique de 2003, les différences de champ magnétique et le niveau d'éclairage d'un lieu peuvent eux aussi susciter une impression de hantise. Les infrasons, inaudibles pour l'oreille humaine, peuvent provoquer un sentiment de peur, voire d'horreur ou de panique. De même, si l'on suggère à des visiteurs qu'ils entrent dans un lieu hanté, ils seront plus nombreux à faire part de perceptions relevant du paranormal. Ces cas de hantise s'ancrent également dans d'obscures histoires personnelles et familiales, régies par un lourd secret, un inceste ou un crime. Une maison peut alors être habitée de présences fantomatiques: des bruits de pas dans le couloir, une porte qui s'ouvre, le téléviseur qui s'allume, une ombre qui passe… La personne hantée projette dans ces manifestations un passé douloureux. *« Dans mon travail thérapeutique, j'invite le patient à discuter avec son fantôme, en l'imaginant assis sur la chaise voisine »*, raconte Patrick Clervoy. Durant certains de ces entretiens fantomatiques, le médecin ressent qu'il se passe quelque chose dans la pièce!

V. VERMEIL/REA

« DANS MON TRAVAIL THÉRAPEUTIQUE, J'INVITE LE PATIENT À DISCUTER AVEC SON FANTÔME, EN L'IMAGINANT ASSIS SUR LA CHAISE VOISINE »

Patrick Clervoy, psychiatre

L'astre se rapproche de la Terre, provoquant l'effroi

Les manifestations paranormales peuvent être aussi collectives, et d'autant plus troublantes que des témoignages concordants leur donnent du crédit. Dans le village portugais de Fátima, en juillet 1917, la Vierge promit à trois jeunes bergers d'accomplir un miracle le 13 octobre. Ce jour-là, des dizaines de milliers de personnes attendaient quand soudain une clameur gagna la foule: le Soleil bougeait! L'astre envoya des rayons de couleur puis se rapprocha de la Terre, provoquant l'effroi, avant de regagner sa place au firmament. Cette danse du Soleil pourrait s'expliquer par l'image rémanente de l'astre ou par la conjonction de phénomènes météorologiques: une masse d'air en forme de lentille, tourbillonnante et chargée de cristaux de glace réfractant la lumière solaire. Mais cette manifestation collective peut aussi s'expliquer par un puissant phénomène empathique au sein de la foule, émotions et représentations se communiquant entre les personnes. Un conformisme spontané serait ici à l'œuvre. Patrick Clervoy explique: *« Lorsqu'un groupe dans lequel je suis immergé perçoit quelque chose, je reçois cette dictée émotionnelle. »* L'individu peut être gagné par la ferveur, dans un intense sentiment de communion. Selon le psychiatre, *« être ensemble est un stimulant de la ferveur et active nos dispositions spirituelles »*. Y compris dans des assemblées athées, comme celles des francs-maçons.

Hausse importante des demandes d'exorcisme

Plus généralement, les phénomènes paranormaux répondent à des attentes spirituelles partagées. En témoigne cette épidémie d'apparitions de soucoupes volantes aux États-Unis dans les années 1950, que le psychanalyste suisse Carl Gustav Jung expliqua comme le besoin d'inscrire des événements dans un ciel vide de manifestations divines.

Quant à la possession démoniaque, ce n'est pas une croyance révolue. L'Église enregistre une hausse des demandes d'exorcisme, à mesure de 1500 par an pour la seule région parisienne! Pour le psychiatre et psychanalyste Alberto Velasco, qui a collaboré pendant treize ans avec le prêtre exorciste Maurice Bellot, le diable est l'incarnation d'un désir détourné: *« Il interpelle le sujet en lui disant: ton désir dont tu ne veux rien savoir, moi, je te le dévoile. »* De fait, le démon se tient au carrefour des comportements et pensées considérés comme déviants, notamment sexuels. Le corps du possédé, animé de convulsions, exprime une jouissance. À Loudun, où les quatorze sœurs d'un couvent d'ursulines furent possédées en septembre 1632, courant à demi nues sur les toits, la mère supérieure Jeanne des Anges décrit ainsi ses convulsions: *« Le diable me trompait souvent par un petit agrément que j'avais aux agitations et autres choses extraordinaires qu'il faisait dans mon corps. »* Le corps possédé aurait aussi une force herculéenne. Rien de surnaturel, explique le psychiatre: sous l'effet d'une pulsion, le corps déploie une grande force. Quant à des cas de lévitation, signe d'une possession au même titre que parler une langue inconnue ou connaître des choses à distance, le père Maurice Bellot n'en a jamais vu! Pour Alberto Velasco, *« le diable existe, il dit la vérité: celle de l'inconscient »*, une vérité qui tient l'âme et anime le corps. **FRANÇOIS FOLLIET**

Hommage aux victimes des attentats du 13-Novembre, à Paris.

WILLIAM DUPUY / DIVERGENCE

ÉMOTIONS

Pourquoi **pleure-t-on ?**

Larmes basales, larmes de douleur, larmes sentimentales… Si toutes ne nous font pas forcément du bien, elles auraient toutefois un rôle social important.

Nous mouiller les joues parce qu'on est triste : les émotions ont parfois de drôles d'effets ! Que la peur ou la surprise produise une accélération du cœur, une dilatation des pupilles ou une irrigation des muscles, cela se comprend. Le corps se prépare à l'action. Mais les larmes… Henrique Sequeira, neuroscientifique à l'unité Sciences cognitives et sciences affectives, à Lille, le reconnaît : *« Individuellement, elles ne servent pas à grand-chose. Juste à hydrater les globes oculaires. »*

« Au commencement était l'émotion, mais au commencement de l'émotion était l'action » : c'est le neurobiologiste Antonio Damasio qui détourne ainsi l'évangile de Jean afin de décrire les émotions. S'agit-il de réponses à l'environnement, de phénomènes purement cérébraux ? Les chercheurs en débattent. Une chose est claire : il se passe quelque chose dans le cerveau… La peur active l'amygdale, la colère, le cortex orbitofrontal, la joie irradie tout l'avant du cerveau et l'amygdale. La tristesse, quant à elle, stimule le cortex cingulaire, une région également engagée dans différentes tâches cognitives, dont le calcul mental. Ce signal cérébral active, via le système nerveux autonome – qui régule les organes et assure la manifestation des émotions –, les glandes lacrymales.

Pour le spécialiste des pleurs Ad Vingerhoets, qui dirige un laboratoire spécialisé en sciences affectives à l'université de Tilbourg, aux Pays-Bas, il faut distinguer les larmes basales, qui protègent les yeux et facilitent la vision, des larmes de douleur (physique, émotionnelle, empathique voire sociale) et des larmes sentimentales, qui surviennent dans les situations positives. Les premières sont produites de manière réflexe par les glandes lacrymales en réponse à un stress local, les autres impliquent le cerveau. Ces dernières contiendraient même une petite dose d'hormones. *« Certains pensent que cela*

permet de réguler l'état émotionnel », rapporte Victor Chung, doctorant en sciences cognitives et émotionnelles à l'Institut Jean-Nicod (Paris). Mais le mécanisme n'a pas été élucidé. Ad Vingerhoets doute d'ailleurs de cet effet : *« L'idée que pleurer nous permet de nous sentir mieux est un mythe. Cela dépend notamment de la façon dont les autres réagissent. »* Cet aspect intrapersonnel reste donc très discuté.
Alors que la fonction interpersonnelle des pleurs fait consensus. Henrique Sequeira l'affirme : *« Les larmes ont une incidence sur le comportement d'autrui. »* En pleurant, nous montrons notre détresse à nos congénères. C'est un message visuel fort. D'ailleurs, les enfants savent que c'est un bon moyen d'attirer l'attention des adultes. Ad Vingerhoets y voit l'explication du phénomène d'un point de vue évolutif : c'est un signal puissant et visible de loin.

Ces « Madeleine » qui ne peuvent garder l'œil sec au cinéma…

Des recherches menées au Japon laissent penser que les chiens, eux aussi, pleurent pour émouvoir les humains. Les chercheurs ont montré que le volume de larmes augmente lorsque les animaux retrouvent leur propriétaire après une séparation. En réaction, les images de toutous qui semblent pleurer sont jugées plus positives par les humains que celles de chiens aux yeux secs.
De fait, il est difficile de rester de marbre face à des larmes. *« La mimique faciale de pleurs provoque une réaction d'empathie. En réponse, celui qui en sera témoin sera poussé à diminuer son agressivité »*, explique Henrique Sequeira. Ad Vingerhoets a présenté à des volontaires des photos de personnes ressentant diverses émotions. L'ajout numérique de larmes sur des visages tristes, en colère ou apeurés, accroît la perception de l'émotion. Pour le psychologue et son équipe, les larmes accentuent les comportements prosociaux, comme l'entraide, et favorisent la cohérence sociale.
Dans des recherches à paraître, Victor Chung étudie cette dimension collective : comment une expérience partagée est-elle influencée par les émotions des autres, et vice versa ? La joie d'un concert est bien plus intense lorsqu'on n'en est pas l'unique spectateur… Le neuroscientifique indique que cette expérience commune implique une synchronisation de paramètres biologiques, comme la respiration ou le rythme cardiaque. Pour les larmes, en revanche, l'effet collectif semble plus ambigu. La tristesse est souvent ressentie comme plus intense lorsqu'on est seul. Serait-elle plus difficile à partager ?
Et qu'en est-il des larmes de joie ? Pour Ad Vingerhoets, les émotions fortes, positives ou négatives, ont un point commun : elles nous plongent dans l'impuissance. *« Nous ne savons pas comment exprimer notre joie extrême. Cette incapacité peut se traduire par des larmes »*, explique-t-il. Celles-ci jaillissent lorsque l'émotion nous submerge, quelle qu'elle soit.
Mais face aux pleurs, nous ne sommes pas tous égaux. Si la tendance aux larmes est associée à des états émotionnels pathologiques, comme la dépression, nous connaissons tous une ou deux Madeleine à qui il est impossible de garder l'œil sec au cinéma. Pour certains psychologues, ce serait le témoignage d'une hypersensibilité. Henrique Sequeira estime qu'il s'agit d'un trait de la personnalité, et non d'une caractéristique neurobiologique comme le suggèrent certains auteurs. Par ailleurs, Ad Vingerhoets note que selon certaines études, les personnes ayant tendance à pleurer davantage que la moyenne seraient plus enclines à manifester des comportements prosociaux, voire de haute moralité. Les Madeleine ont du bon.
Enfin, pleurer n'a pas le même sens selon les pays. *« Certaines cultures (entre autres en Amérique du Sud) connaissent les larmes de salutation ou larmes de bienvenue,* raconte le chercheur néerlandais. *Au lieu de serrer la main, on se met à pleurer. »* ■ **AGNÈS VERNET**

Passer du rire aux larmes, une histoire de valence

Les émotions se manifestent dans le corps mais aussi dans le cerveau. Pour les décrire, les neuroscientifiques ont emprunté aux psychologues leur classification. Ils distinguent ainsi six grandes émotions : joie, tristesse, surprise, peur, colère et dégoût, qui peuvent varier en valence (tonalité positive ou négative) et en activation ou « éveil » (intensité). *« On peut se représenter les émotions comme un espace continu. La joie et la colère, par exemple, sont opposées en valence, mais proches par leur degré d'éveil »*, décrit Victor Chung. En considérant ces deux dimensions pour analyser les émotions, passer du rire aux larmes ne serait qu'un changement de valence. De son côté, Ad Vingerhoets remarque que les réseaux cérébraux responsables du rire et des larmes sont proches ou connectés. *« Nous savons que parmi les personnes atteintes de troubles cérébraux (AVC, sclérose en plaques…), une minorité significative souffre de pleurs pathologiques (sans raison),* remarque-t-il. *Et dans certains cas, cela va de pair avec un rire pathologique. »*

GUILLAUME NGUYEN-DINH

« LA MIMIQUE FACIALE D'UN INDIVIDU QUI PLEURE CRÉE DE L'EMPATHIE. CELUI QUI EN EST TÉMOIN SERA POUSSÉ À DIMINUER SON AGRESSIVITÉ »

Henrique Sequeira, neuroscientifique, laboratoire Sciences cognitives et sciences affectives (SCALab, Lille)

GETTY IMAGES

SENSORIALITÉ

Chatouilles : à deux, c'est mieux !

S'auto-chatouiller ne produit dans la grande majorité des cas aucun effet. Mais si l'action vient de l'extérieur, le résultat est souvent tout autre. Ces réactions distinctes participent de l'aptitude à la survie.

S'auto-chatouiller en se faisant guili-guili sous les bras laisse la plupart d'entre nous de marbre… et heureusement ! Car cette absence de réaction participe paradoxalement de l'aptitude à la survie : distinguer les sensations tactiles qui sont le produit de nos propres actions et celles venant de l'extérieur est primordial. Comme l'explique le psychologue Gilles Lafargue, du laboratoire Cognition santé société à l'université de Reims : ***« Ce mécanisme, fruit de l'évolution biologique, permet de réagir rapidement à une attaque ou une menace et d'augmenter ainsi les chances de survie. Mais il fait aussi partie d'un phénomène global de conscience de soi : je suis celle, ou celui, qui a causé ou engendré telle ou telle action. »*** **Pour initier un mouvement, notre cortex moteur envoie des commandes aux muscles afin qu'ils se contractent. Dans le même temps, notre cerveau prédit les conséquences sensorielles de ce geste. Si action et prédictions concordent, la perception est atténuée. En revanche, si l'acte ne correspond pas à la prédiction, quant au délai, à la force appliquée ou à la zone chatouillée, l'effet sensoriel est maximal. D'autant plus si le sujet ne s'y attend pas ! L'état d'alerte est alors aussitôt déclenché. Il existe toutefois des personnes pour qui les auto-chatouilles sont aussi intenses que des guilis prodigués par un tiers : les schizophrènes. De plus, détaille Gilles Lafargue,** ***« une personne schizophrène pourra se saisir d'un téléphone tout en étant fermement convaincue qu'elle n'en a pas l'intention, mais qu'elle est sous le contrôle d'une force extérieure : la CIA, un marabout, etc. Il semble que ce soit le dysfonctionnement d'un mécanisme cérébral qui soit impliqué à la fois dans la perception anormale du corps en action et dans la formation de croyances délirantes. »***

HERVÉ RATEL

HÉMATIDROSE

De la sueur, du sang et des larmes

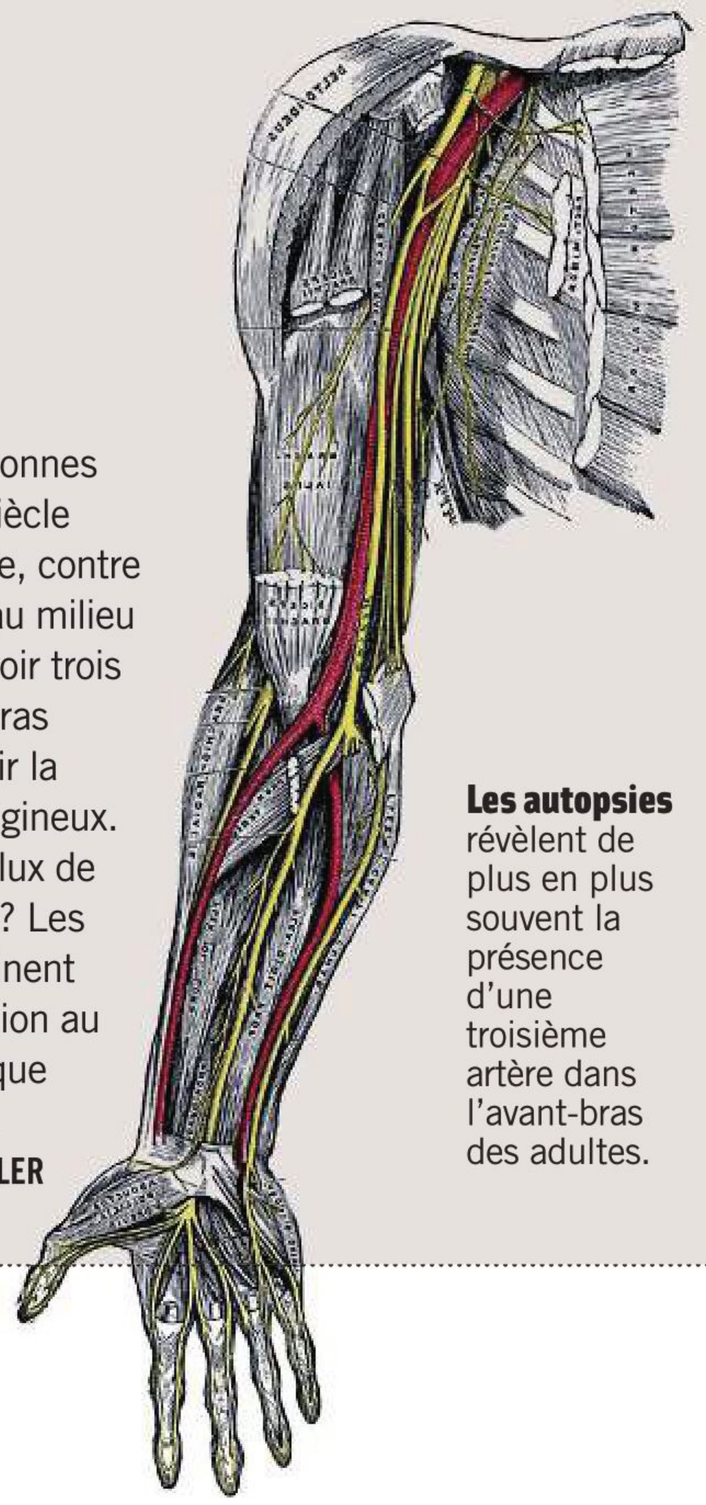
Dans la culture occidentale, la suée de sang renvoie à un épisode crucial du christianisme : l'étrange sueur qui couvrit le corps de Jésus, juste avant que Judas ne lui donne le baiser du traître, marquant le début de sa Passion. Mais dans le monde contemporain, ce phénomène relève d'une maladie très rare nommée hématidrose, qui s'expliquerait par un dysfonctionnement hormonal provoquant un dérèglement de la production d'adrénaline atteignant des taux vingt fois supérieurs à la moyenne. Conséquence de cette surproduction : une anxiété accrue, accompagnée d'une élévation anormale de la pression sanguine entraînant une dilatation extrême des très fins vaisseaux de la peau… jusqu'à leur rupture. Le sang se déverserait alors dans les glandes sudoripares voisines et franchirait la barrière cutanée. Cette transpiration de sang s'observe surtout au niveau des mains et du visage, avec parfois l'apparition de larmes de sang, sans aucune blessure ni anomalie de coagulation. Si les cas d'hématidrose restent rares, on en trouve mention jusque dans les écrits d'Aristote, et l'historienne médicale et hématologue canadienne Jacalyn Duffin rapporte 28 cas, entre 2004 et 2017, ayant fait l'objet de publications. Cette maladie touche le plus souvent des jeunes filles, 14 ans en moyenne, et les symptômes spectaculaires perdurent environ quatre années. La prescription d'un médicament bêtabloquant permet de réduire le nombre de crises.

FRANÇOIS FOLLIET

ÉVOLUTION HUMAINE

Une nouvelle artère dans l'avant-bras

Parmi les facéties de l'évolution humaine, on notera que la température corporelle tend à baisser – la moyenne s'affiche désormais à 36,6 °C –, la densité osseuse à diminuer et les dents de sagesse à disparaître. Mais d'autres modifications sont plus subtiles. Les autopsies révèlent ainsi de plus en plus fréquemment la présence non de deux, mais de trois artères dans l'avant-bras des adultes. Ce vaisseau surnuméraire est la relique d'une structure embryonnaire en principe transitoire : il s'agit de l'artère médiane, dont le rôle est d'alimenter en sang le bras et la main du fœtus. Elle doit normalement régresser au profit des deux autres au fur et à mesure de la croissance du futur bébé, pour finir par disparaître avant même la naissance. Mais d'après une équipe australienne, dont les conclusions ont été publiées dans le *Journal of Anatomy* en 2020, 30 % des personnes nées à la fin du XX[e] siècle possèdent cette artère, contre 10 % de celles nées au milieu des années 1880. Avoir trois artères dans l'avant-bras pourrait même devenir la norme en 2100. Vertigineux. Mais pourquoi cet afflux de sang supplémentaire ? Les auteurs de l'étude peinent à trouver une explication au phénomène. Preuve que l'évolution peut agir à l'aveugle ? **MARINE CYGLER**



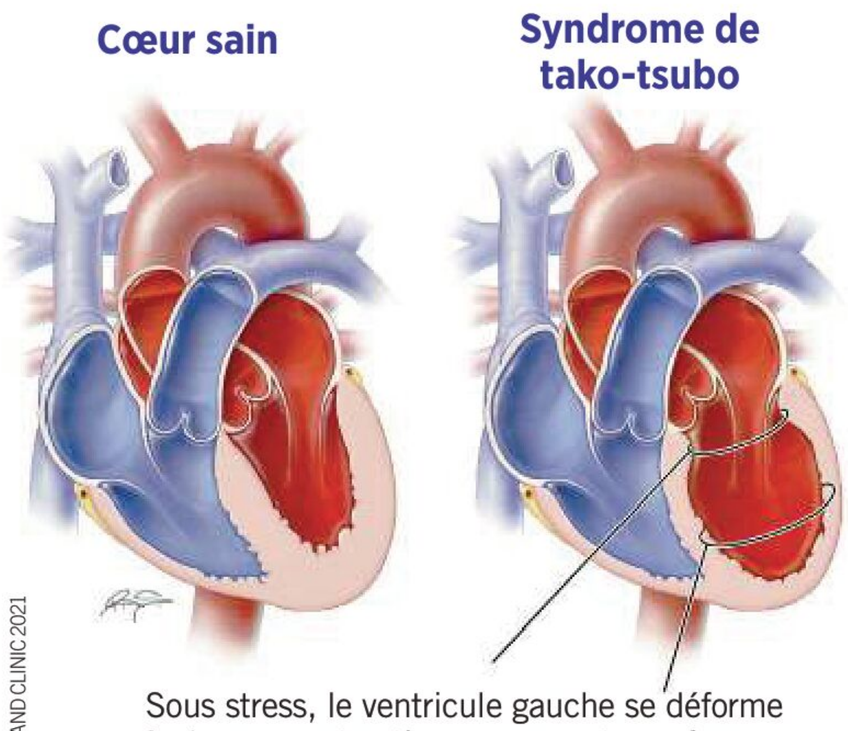
WIKIPEDIA DOMAINE PUBLIC

Les autopsies révèlent de plus en plus souvent la présence d'une troisième artère dans l'avant-bras des adultes.

CARDIOPATHIE

Le cœur presque brisé par la douleur

Après un choc émotionnel – perte brutale du conjoint, agression violente, accident de la route –, il arrive que le muscle cardiaque se contracte de façon anormale, en général 24 heures après le traumatisme. La douleur dans la poitrine est si intense que la personne qui en souffre doit être hospitalisée en urgence. C'est le syndrome de *tako-tsubo*, ou cardiopathie de stress. *« On doit s'assurer au plus vite qu'il ne s'agit pas d'un infarctus : grâce aux examens d'imagerie, on vérifie que les artères cardiaques ne sont pas bouchées »*, explique le cardiologue Antoine Sauguet, du Centre de la douleur thoracique à la clinique Pasteur à Toulouse. L'échographie révèle que le cœur a pris une forme très spécifique d'amphore ou de piège à poulpe (traduction littérale du japonais *tako-tsubo*). Si le *tako-tsubo* n'est pas directement fatal, et guérit spontanément en quelques jours à quelques semaines, il n'en est pas moins dangereux à cause de ses éventuelles complications. *« On redoute que la contraction anormale du cœur n'engendre un trouble du rythme qui peut, lui, entraîner un arrêt cardiaque. Le patient reste à l'hôpital sous surveillance une semaine »*, poursuit le cardiologue. Qui peut être touché ? Tout le monde, à tout âge, y compris des personnes en très bonne santé. *« Et davantage lorsqu'on a déjà subi un* tako-tsubo. *C'est le seul facteur de risque identifié à ce jour, sans qu'on comprenne pourquoi »*, précise Antoine Sauguet. De même qu'on ne s'explique pas que neuf personnes touchées sur dix soient des femmes de plus de 50 ans. D'ailleurs, le mécanisme à l'origine du *tako-tsubo* reste lui-même mystérieux. On suppose que face à un événement traumatisant, les cellules nerveuses déchargent dans le sang une quantité phénoménale de catécholamines, des molécules qui régulent le rythme cardiaque et la pression artérielle, lesquelles entraînent une cascade de réactions qui s'achève avec des anomalies de contraction mimant un infarctus. **M. C.**



CLEVELAND CLINIC 2021

Sous stress, le ventricule gauche se déforme à chaque contraction en prenant une forme de « piège à poulpe », peu efficace pour pomper le sang.

TRANSFERT HORIZONTAL DE GÈNES

Quand l'ADN franchit la barrière des espèces

On hérite des gènes de ses parents, c'est une chose acquise. Et si l'on en piquait aussi aux voisins ? Les généticiens appellent « transferts horizontaux de matériel génétique » le fait de récupérer de l'ADN d'autres individus que ses ascendants. Le phénomène est bien documenté pour les bactéries, qui s'échangent fréquemment des chromosomes : il leur est ainsi plus facile de s'adapter aux changements de milieu ou à la présence d'antibiotiques – ce qui renforce l'antibiorésistance.

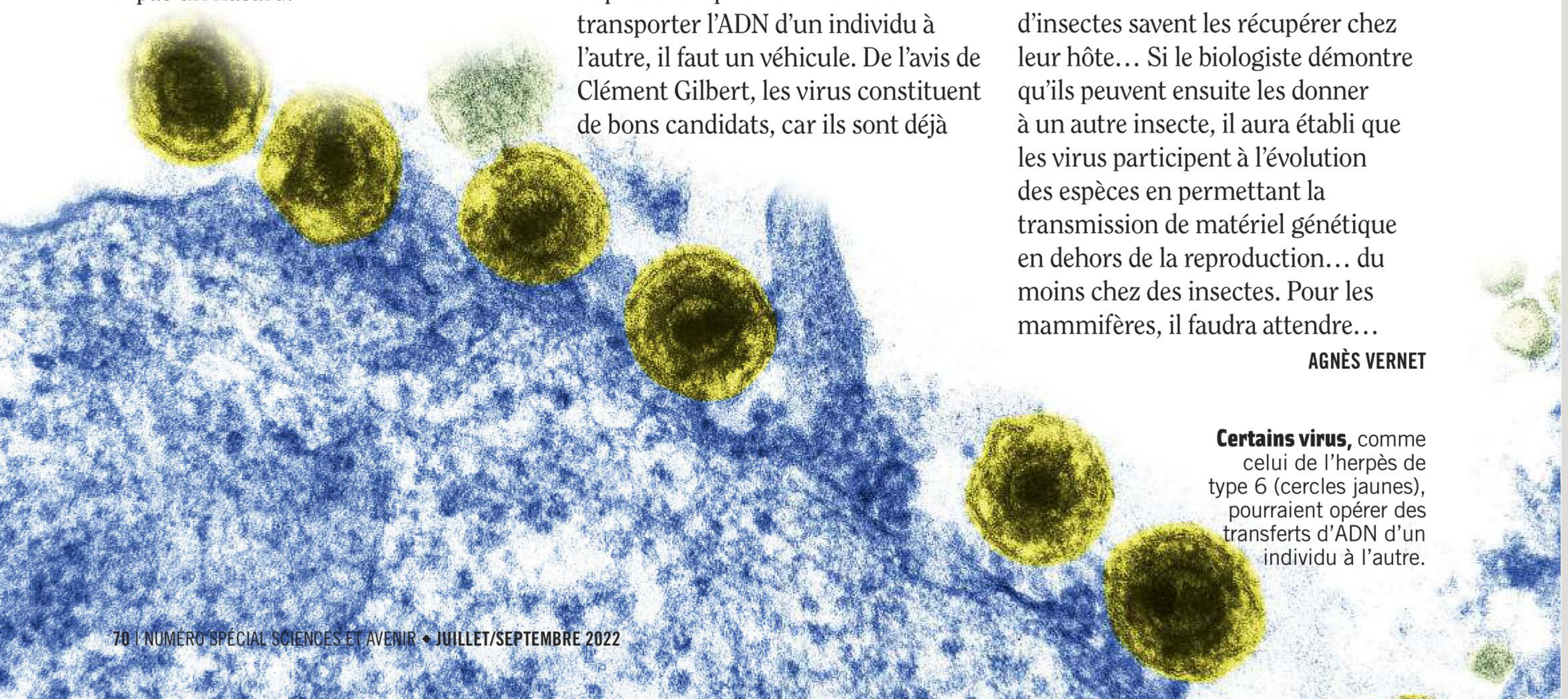
Mais le transfert horizontal ne concerne pas seulement les micro-organismes. En 2021, des chercheurs de l'université Queen's, au Canada, ont découvert que le hareng de l'Atlantique partage une même protéine antigel… avec deux espèces d'éperlan ! Aucune chance qu'ils l'aient héritée d'un ancêtre commun, montre l'étude de leur phylogénie. Il semble donc que le hareng ait donné son gène aux éperlans par transfert horizontal. À ce jour, l'exemple est unique entre vertébrés. Et s'il implique des poissons, ce n'est pas un hasard.

« Le processus est probablement plus facile en milieu aquatique que sur la terre ferme, estime Clément Gilbert, spécialiste de la génétique évolutive au CNRS, *car les poissons se reproduisent par fertilisation externe : mâles et femelles expulsent leurs gamètes, qui forment l'œuf directement au contact du milieu. »* Pour qu'un morceau d'ADN entre dans le génome d'organismes multicellulaires, il faut en effet qu'il s'intègre dans les gamètes. Un exploit hasardeux pour les mammifères. Car leurs gamètes sont ultra-protégés, jamais exposés au milieu, et rarement en contact avec les autres lignées cellulaires de l'individu, même au stade embryonnaire.

Un troc de gènes semble donc très improbable entre humains. Pourtant, d'après l'analyse comparée de génomes de primates et de vertébrés, *« des transferts horizontaux ont eu lieu chez les ancêtres des primates, il y a plus de 60 millions d'années,* reprend Clément Gilbert. *Cependant, il n'y a aucune preuve que les humains aient récemment acquis des gènes. »* Reste à comprendre comment se produit le phénomène. Pour transporter l'ADN d'un individu à l'autre, il faut un véhicule. De l'avis de Clément Gilbert, les virus constituent de bons candidats, car ils sont déjà donneurs de matériel génétique. Pour se multiplier, ils empruntent en effet la machinerie cellulaire de leur hôte et parfois, comme le VIH, insèrent leur matériel génétique dans celui de la cellule infectée : celle-ci le lit ainsi comme de l'ADN endogène. Mais pour qu'il y ait transfert horizontal, encore faudrait-il que le processus se produise dans des gamètes. Impossible pour la plupart des virus… mais seulement la plupart. Par exemple, 1 % de la population humaine porte des morceaux d'ADN du virus de l'herpès, intégrés il y a plus de 50 000 ans ! Les virus pourraient-ils ainsi opérer des transferts d'ADN d'un individu à l'autre, d'une espèce à une autre ? Il semble que oui. Non pour des gènes, mais pour des séquences qui, sans coder des protéines, structurent et régulent l'expression du génome. Parmi elles, les transposons, ou éléments transposables, capables de se déplacer le long de l'ADN, retiennent l'attention des chercheurs. Clément Gilbert a identifié plus de 2 000 transferts horizontaux de ces transposons entre insectes, et plus de 900 entre vertébrés. Des virus d'insectes savent les récupérer chez leur hôte… Si le biologiste démontre qu'ils peuvent ensuite les donner à un autre insecte, il aura établi que les virus participent à l'évolution des espèces en permettant la transmission de matériel génétique en dehors de la reproduction… du moins chez des insectes. Pour les mammifères, il faudra attendre…

AGNÈS VERNET

SPL/SUCRÉ SALÉ



Certains virus, comme celui de l'herpès de type 6 (cercles jaunes), pourraient opérer des transferts d'ADN d'un individu à l'autre.

ÉLECTROSENSIBILITÉ

« La situation pourrait être plus complexe que ce qu'en perçoivent les patients »

Wifi, téléphones, micro-ondes… Depuis vingt ans, des patients se plaignent de troubles liés à une surexposition aux champs électromagnétiques. Mais ie lien de causalité est difficile à établir.

De plus en plus de personnes se disent sensibles aux champs électromagnétiques. Mais l'hyperélectrosensibilité (EHS) semble encore bien mystérieuse…

Il ne fait aucun doute que les personnes qui s'en plaignent sont effectivement malades. Cependant, on ignore si ces troubles, dont les symptômes ont été reconnus par l'OMS en 2005, sont attribuables aux ondes. Le problème, c'est qu'il y en a plus de quatre-vingts : maux de tête, fatigue, troubles du sommeil et de la concentration, picotements… Et aucun n'est spécifique. Il est donc difficile d'établir un repère clinique caractéristique de la maladie. Or les patients ne se plaignent pas tous des mêmes symptômes, ni des mêmes sources d'exposition : des basses fréquences – générées par le courant circulant dans des appareils électriques – aux radiofréquences, produites par la téléphonie mobile, le wifi ou les micro-ondes. Alors que ces ondes interagissent avec le vivant de manière très différente. Jusqu'à présent, aucune causalité ne peut être mise au jour, car les études menées n'ont pas été concluantes. Les patients ne sont vraisemblablement pas capables de détecter consciemment s'ils sont exposés, mais on ne sait pas s'il peut y avoir une perception inconsciente.

THIERRY PASQUET / SIGNATURES

YVES LE DRÉAN

Biologiste moléculaire spécialiste du bioélectromagnétisme à l'Institut de recherche en santé, environnement et travail.

Mais est-il vraisemblable que l'humain soit biologiquement équipé pour percevoir les ondes ?

Au sein du règne animal, il existe deux systèmes de magnétoréception. La magnétite – des cristaux minéraux d'oxyde de fer – et les cryptochromes, des protéines qui s'activent sous l'action de la lumière. Chez certains animaux, on sait que la magnétite est associée au sens de l'orientation, et il a été démontré que, chez les oiseaux et les insectes, les cryptochromes servent à détecter le champ magnétique statique terrestre. En revanche, s'ils sont bien présents chez l'humain, ils ne semblent associés à aucune structure de perception. Il est fort probable qu'ils ont perdu au cours de l'évolution leur fonctionnalité liée aux champs magnétiques.

Quelles sont les hypothèses quant à l'origine de cette maladie ?

Intoxication aux métaux lourds, sensibilité aux odeurs chimiques, problèmes immunitaires, effet nocebo… Nous avons passé en revue de nombreuses théories dans un rapport de l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses) paru en 2018, mais elles n'ont pas toutes été explorées de façon exhaustive. L'une des pistes que nous étudions dans notre laboratoire est celle du stress oxydant : une forme d'agression des constituants de nos cellules par l'oxygène. Dans certains cas, on constate effectivement une augmentation de l'oxydation des molécules lorsqu'elles sont exposées à des champs électromagnétiques. Cependant, ces niveaux sont à peine détectables. De plus, le stress oxydant se produit naturellement, par le biais de l'air respiré, des aliments, au cours du processus de vieillissement, et notre corps est équipé d'enzymes capables de réparer ou d'éliminer les éléments oxydés… J'ignore si cette piste nous donnera des résultats positifs. Il est possible que la situation soit plus complexe que ce qu'en perçoivent les patients ; davantage que les ondes, il se pourrait qu'un cocktail de facteurs environnementaux et de sensibilité individuelle soit impliqué. Cette complexité expliquerait pourquoi, depuis près de vingt ans, nous n'avons pas beaucoup avancé.

PROPOS RECUEILLIS PAR WILLIAM ROWE-PIRRA

LES PASSÉS DU MYSTÈRE

Vue aérienne de Stonehenge, au sud de l'Angleterre. Ce site, datant d'environ 3000 ans avant notre ère, est le témoignage le plus emblématique, mais aussi le plus énigmatique, de la culture mégalithique.

DAE SASITORN / ARDEA.COM/MARY EVANS/ABACAPRESS.COM

MÉGALITHES

Pourquoi ont-ils dressé **Stonehenge ?**

Incarnations d'ancêtres illustres, calendriers astronomiques ou… détecteurs sismiques ? Les archéologues s'interrogent encore sur la fonction précise des 35 000 monuments mégalithiques érigés du Danemark à l'Afrique par les premiers agriculteurs. Notamment du plus fascinant d'entre eux, le mythique cercle de pierres de Stonehenge.

Avec près d'un million de visiteurs par an, Stonehenge est l'un des sites archéologiques les plus connus et fréquentés au monde. Voilà plus d'un siècle que les archéologues auscultent ses mystérieux cercles concentriques de menhirs, portiques et trilithes – dont les plus imposants culminent à 4 mètres et pèsent près de 25 tonnes. Pourtant, la fonction de ce monument, érigé entre 3 000 et 2 800 avant notre ère près de Salisbury, dans le sud de l'Angleterre, demeure nimbée de mystère…

Geoffroy de Monmouth, évêque et historien gallois du XII^e^ siècle, raconte dans son *Historia regum Britanniae* (1138) que les menhirs de Stonehenge avaient, à l'origine, été érigés par des géants sur le mont Killaraus, en Irlande. Merlin l'Enchanteur les aurait transportés par magie en Angleterre afin de dresser une sépulture en l'honneur de trois cents nobles bretons traîtreusement assassinés par un chef saxon nommé Hengest. Toute légende cache un brin de vérité… car les pierres bleues du cercle intérieur de Stonehenge n'ont effectivement pas toujours occupé le lieu qu'on leur connaît de nos jours. ◆◆◆

◆◆◆ En 2021, les travaux de Mike Parker Pearson, spécialiste du Néolithique des îles Britanniques à l'institut d'archéologie de l'University College de Londres, et de son équipe, publiés dans la revue *Antiquity,* ont montré que les pierres de Stonehenge ont fait un curieux voyage. Dans une étude précédente, les archéologues avaient déjà prouvé que les blocs provenaient de carrières situées au sud-ouest du pays de Galles, dans les collines de Preseli. Ils avaient en effet retrouvé là, dans les affleurements rocheux, des outils suggérant que l'endroit était exploité au Néolithique et que des pierres y avaient été extraites vers 3400 avant notre ère.

D'abord érigées à 225 kilomètres du lieu où elles se trouvent à présent

Leur étude récente révèle qu'elles n'ont pas directement été acheminées vers l'Angleterre mais d'abord dressées, entre 3400 et 3200 avant notre ère, en un site nommé Waun Mawn, dans ces mêmes collines galloises… soit 225 kilomètres à l'ouest du lieu où elles se situent à présent. Les archéologues y ont en effet découvert les trous laissés par un ancien cercle mégalithique démantelé, dont le diamètre est étrangement identique à celui du fossé qui clôture Stonehenge. La datation par luminescence optiquement stimulée des sédiments situés dans les trous indique en outre que le cercle a été dressé peu de temps avant celui de Stonehenge. Mieux, la forme pentagonale atypique d'un des trous correspond parfaitement à celle de l'une des pierres de Stonehenge, et l'orientation des deux sites vers le lever du soleil au solstice d'été confirme leur lien étroit. D'autres indices vont dans ce sens : l'analyse isotopique de vestiges de dents humaines identifiés près de Stonehenge semble montrer que la population qui occupait l'endroit provenait justement des collines de Preseli.

Mais pourquoi ces individus ont-ils transporté un tel édifice sur une si longue distance ? L'équipe de Mike Parker Pearson suppose que les pierres étaient peut-être, pour les peuples qui les ont dressées, une incarnation de leurs ancêtres, d'une importance symbolique si grande qu'au moment de migrer, ils les auraient emportées avec eux.

Stonehenge n'est qu'un exemple, certes spectaculaire, d'une pratique culturelle répandue au Néolithique dans une bonne partie de l'Europe. Rien que dans les îles Britanniques et en Irlande, on a recensé environ 1300 de ces cercles. De la Suède aux rives de la Méditerranée, ils sont nombreux à avoir été érigés à des fins cérémonielles, funéraires ou astronomiques.

YVAN BOËLLE /ANDIA.FR

Seahenge : du bois dont on fait les cercles…

Pour la construction de cercles cérémoniels, la pierre n'avait pas le monopole. Quelques enceintes de bois datant du Néolithique ou de l'âge du bronze ont ainsi été découvertes dans les îles Britanniques, mais aussi en Amérique du Nord, généralement trahies par les trous dans le sol laissés par les poteaux, le bois résistant bien moins aux vicissitudes du temps. Seahenge, la plus connue et la mieux préservée d'entre elles, se situe près du village de Holme-next-the-Sea, sur la côte est de l'Angleterre. Constitué de cinquante-cinq petits troncs de chêne fendus arrangés autour d'une large souche d'arbre retournée, ce cercle fut érigé en 2049 avant notre ère sur ce qui était alors un marais salant. Il fut progressivement recouvert de tourbe, jusqu'à ce que la montée des eaux et le lent travail d'érosion des marées permettent de le redécouvrir en 1998. Conscient de la vulnérabilité de ce vestige monumental, les archéologues ont entrepris de le déterrer afin de le restaurer puis de le conserver au sec, au Lynn Museum de King's Lynn. Aucun indice ne permet de définir précisément la destination de ce site dans les années qui suivirent son érection, mais des fragments de poteries de l'âge du bronze tardif montrent qu'il fut à nouveau exploité par la population locale quelques siècles plus tard. L'hypothèse prédominante en fait un lieu de cérémonie funéraire ; on y pratiquait peut-être l'excarnation, qui consiste à retirer la chair et les organes d'un corps avant son inhumation, et les piliers de bois auraient délimité un tumulus. Mais les preuves manquent… Aujourd'hui, et jusqu'en juillet 2022, le cercle est exposé au British Museum de Londres. W. R.-P.

ALAMY/PHOTO12

L'enceinte, érigée en 2049 avant notre ère à l'est de l'Angleterre, est composée de 55 poteaux de chêne disposés autour d'une souche.

terranée, on dénombre près de 35 000 sites mégalithiques : menhirs, dolmens, cromlechs, allées couvertes et autres cairns. À Carnac, en Bretagne, ce sont les alignements de presque 4 000 pierres dressées, datés de 4 500 à 3 500 avant notre ère, qui laissent perplexe. Mythes et théories abondent quant à leur fonction, de la plus fantaisiste à la plus prosaïque : une légende locale – et anachronique – mentionne une légion romaine pétrifiée par la sorcellerie de Merlin, encore lui ! Plus sérieusement, on parle aussi de détecteur d'ondes sismiques, de facture quelque peu primitive, ou de calendrier astronomique utilisé pour observer la lune et les étoiles et, par extension, mieux savoir quand planter et récolter.

Les alignements de Carnac, en Bretagne, constituent la plus grande concentration de menhirs au monde (près de 3 000 !) sur plus de quatre kilomètres. Les raisons de cet agencement méticuleux restent mystérieuses.

Comment expliquer que cette pratique ait été si courante, et comment s'est-elle répandue ? Au début du XX^e siècle, la naissance proche-orientale de la culture mégalithique fait consensus parmi les scientifiques. Une hypothèse toutefois délaissée dans les années 1970, car elle n'est pas corroborée par les datations alors effectuées. En 1977, l'archéologue britannique Colin Renfrew, se fondant sur ces nouvelles données, suggère une origine plurielle du mégalithisme, avec au moins cinq foyers : Bretagne, Portugal, Andalousie, sud-ouest de l'Angleterre et Danemark. Il suppose que la pratique s'est principalement diffusée par voie maritime, le long des côtes d'Europe et jusqu'en Afrique du Nord. En 2019, l'archéologue suisse Bettina Schulz Paulsson désigne au contraire un berceau unique du phénomène mégalithique : la Bretagne. Mais cette hypothèse ne fait ◆◆◆

BERTRAND RIEGER

« DÉCODER LES INTENTIONS DES BÂTISSEURS ET LEURS CRITÈRES SYMBOLIQUES EST UN VÉRITABLE DÉFI POUR LES ANNÉES À VENIR »

Philippe Gouezin, archéologue à l'université de Rennes

◆◆◆ pas l'unanimité, puisqu'elle repose sur des datations au carbone 14 limitées.
En dépit de ces zones d'ombre, une chose est sûre : nombre de ces monuments ont été érigés à partir du Ve millénaire avant notre ère, à une époque charnière de l'histoire humaine, un âge qui voit les communautés de chasseurs-cueilleurs se sédentariser en Europe pour exploiter la terre. En accord avec ce nouveau mode de vie, croyances et coutumes changent. Les cercles de pierres auraient-ils pu servir à marquer l'autorité d'une communauté sur un territoire ? Ils sont imposants et souvent érigés sur des tertres, à la vue de tous, ce qui peut le laisser suggérer. Les archéologues y voient une balise de légitimité : en dressant ces menhirs, les populations asseyaient leur domination ancestrale sur les lieux qu'ils marquaient. Les spécialistes leur prêtent également un rôle de ciment social, de lieu de rassemblement, d'échange, ou encore de culte.

NOMBRE DE CES MONUMENTS ONT ÉTÉ ÉRIGÉS À UNE ÉPOQUE CHARNIÈRE QUI VOIT LES COMMUNAUTÉS DE CHASSEURS-CUEILLEURS SE SÉDENTARISER POUR EXPLOITER LA TERRE

Ces interprétations récentes, parfois divergentes, sont toutefois limitées. *« En raison de leur diversité, il est difficile de déterminer précisément la fonction qu'occupaient les enceintes mégalithiques*, explique Philippe Gouezin, archéologue à l'université de Rennes. *Les formes, utilisations, conceptions architecturales, mais aussi la chronologie, sont tellement différentes selon les régions qu'il est impossible de généraliser. »* Des différences que l'on décèle jusque dans les matériaux employés. Parfois, le bois se substitue à la pierre, comme à Seahenge, près de Holme-next-the-Sea, sur la côte est de l'Angleterre *(lire l'encadré p. 74)*. Si l'on ne parle plus, dans ce cas, de mégalithisme, l'organisation architecturale demeure très similaire. *« Comprendre l'utilité de ces structures est une tâche ardue*, poursuit Philippe Gouezin, *mais il est certain que leur mise en scène était intentionnelle. »* En effet, l'étude archéologique des sites révèle un degré avancé d'élaboration, répondant à des normes assez strictes. *« Tenter de décoder une partie au moins des intentions des bâtisseurs, mieux connaître leurs critères architectoniques, symboliques et sociaux, contribuer au décryptage des mises en scène et décors est un véritable défi pour les années à venir »,* souligne le chercheur.
Ce décryptage devra s'affranchir d'un problème majeur inhérent à l'archéologie et, plus largement, à l'étude des cultures et civilisations du passé : pouvons-nous projeter notre système de pensée actuel sur ces lointains ancêtres afin de comprendre le sens de ce qu'ils ont laissé derrière eux ? Il s'agit de mettre en lumière la manière dont ils percevaient le monde et quelle forme de symbolisme est née de cette perception. C'est la volonté de pousser cette porte et de découvrir ce qui se cache au-delà qui confère à Stonehenge, Seahenge, Carnac, et de nombreux sites à travers le monde, cette dimension de mystère persistant. **WILLIAM ROWE-PIRRA**

LOOKPHOTOS / RICHTER / SUCRÉ SALÉ

Monuments funéraires composés d'une ou plusieurs dalles reposant sur des blocs verticaux, les dolmens, ici sur le site de Cauria, en Corse, pouvaient accueillir plusieurs sépultures.

Émission de France Culture
Carbone 14, 6 janvier 2019 :
Archéologie du bout du monde : la Bretagne !

Documentaire de Peter Chinn :
Stonehenge, ses origines révélées,
Arte, 2021

Jean-Pierre Mohen, *Pierres de mémoire,*
Gallimard, 1998

PYRAMIDE DE KHÉOPS

« Pour les plus enthousiastes, le Big Void abriterait le corps du pharaon »

Depuis sa découverte en 2017, la mystérieuse cavité, située à proximité de la chambre du roi, n'en finit pas de livrer ses secrets. Prochaines révélations attendues à l'automne.

CEA/D. TOUZEAU

SÉBASTIEN PROCUREUR

Physicien nucléaire, responsable scientifique à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) du CEA

La mission ScanPyramids, à laquelle vous participez, a révélé en 2017 des structures insoupçonnées au sein de la pyramide de Khéops…

En effet, les mesures en caméra thermique de la mission, lancée par l'université du Caire et l'institut HIP (Heritage Innovation Preservation), ont pointé une anomalie significative sur la face nord de l'édifice, où deux chevrons surplombent le couloir descendant situé à l'intérieur. Les mesures réalisées ensuite par muographie ont décelé l'existence d'un vide à proximité des chevrons, le North Face Corridor (NFC), long d'au moins 5 mètres. Mais elles ont surtout révélé l'existence du Big Void, une cavité longue d'au moins 35 mètres et haute d'environ 3 mètres située au-dessus de la Grande Galerie qui mène à la chambre du roi.

Plus précisément, comment fonctionne la muographie ?

Elle radiographie les structures grâce aux muons, des particules élémentaires qui jaillissent d'autres particules produites par les rayons cosmiques en entrant dans l'atmosphère. Les muons pénètrent plus ou moins la matière selon sa densité. Au CEA, nous utilisons sur le site, depuis 2016, des télescopes basés sur des détecteurs gazeux, fournissant une image en temps réel. Les détecteurs captent les charges électriques produites lorsque les muons traversent les plaques sensibles contenant un volume de gaz à base d'argon. Ils déterminent le nombre et la trajectoire des particules : moins il y en a dans une direction, et plus il y a de matière.

Que sait-on de la fonction de cette grande cavité ?

D'après certains spécialistes, ce serait une pièce rassemblant du mobilier funéraire. D'autres ont suggéré la réserve de nourriture du pharaon pour son voyage vers l'au-delà. Mais il pourrait aussi s'agir d'une seconde galerie qui aurait servi à déployer un système de contrepoids destiné à hisser les lourds blocs de granite de la chambre du roi. Pour l'écrivain Christian Jacq, ce pourrait être un dispositif antisismique. Les plus enthousiastes espèrent que le Big Void abrite le corps du pharaon, qui n'a jamais été retrouvé. En revanche, l'hypothèse d'un vide de décharge pour soulager la Grande Galerie a pu être écartée.

ScanPyramids va-t-elle livrer d'autres résultats ?

Nous publierons d'ici deux à trois mois les résultats sur le North Face Corridor obtenus grâce à notre deuxième campagne de mesures, menée de fin 2018 à mars 2020. Le Big Void fera l'objet d'une publication ultérieure. Nous pouvons d'ores et déjà statuer sur certaines hypothèses concernant celui-ci, en précisant notamment son inclinaison. Et dire si le NFC rejoint ou non cette grande cavité. Mais avant la publication, nous sommes encore tenus au secret !

L'Égypte a commandé une nouvelle étude : Exploring the Great Pyramid Mission. Pouvez-vous nous en dire plus ?

Cette mission, portée par une équipe américaine, devrait disposer de télescopes à muons d'une surface cent fois supérieure à celles de nos campagnes de mesures, pour délivrer une cartographie 3D détaillée de l'édifice. Mais le financement du projet est encore incertain… tout comme la construction des télescopes.

PROPOS RECUEILLIS PAR FRANÇOIS FOLLIET

Cette magnifique tête représentant peut-être Olokun, le dieu de la Mer yoruba, est l'un des premiers vestiges mis au jour à Ifé, en 1910.

ANDRÉ HELD/AKG-IMAGES

AFRIQUE MÉDIÉVALE

Ifé, la puissance évanouie

Au XIVe siècle, l'opulente et prestigieuse cité, qui produisait de stupéfiantes sculptures, a été brutalement désertée.

C'est l'un des sites les plus fouillés d'Afrique. L'un des plus mystérieux aussi. La cité médiévale d'Ifé, dans le sud-ouest du Nigeria, a laissé des vestiges en forme d'énigme : des fragments d'une ancienne splendeur mêlés aux traces d'un abandon aux allures de sauve-qui-peut. C'est en 1910 que l'explorateur allemand Leo Frobenius met au jour de superbes têtes sculptées en bronze ou en terre cuite. Depuis, une soixantaine ont été découvertes, datant des XIIe-XIIIe siècles. *« Ce sont probablement des portraits de défunts utilisés dans des rituels de mémoire*, note l'archéologue Gérard Chouin, qui codirige les fouilles sous la ville moderne d'Ifé depuis 2015. *Le bronze était un métal de prestige, rare en Afrique de l'Ouest. Il témoigne de la puissance de la cité. De même que la taille invraisemblable de cette dernière, qui couvrait à peu près le même espace que la ville actuelle de 500 000 habitants. »* Les multiples pavements médiévaux exhumés sous l'Ifé contemporaine montrent aussi la sophistication de l'aménagement urbain. Composés d'une myriade de tessons posés de champ, ils permettaient d'évacuer les eaux de pluie. Autre signe de richesse, l'industrie du verre. *« C'est la signature technologique d'Ifé. La ville est, pour le Moyen Âge, le seul centre d'Afrique de l'Ouest connu de fabrication de perles de verre. Elle les utilisait comme moyen d'échange, et on les retrouve dans tout le monde sahélien »*, note le chercheur. Unique dans le paysage ouest-africain médiéval, l'opulente cité est brutalement désertée dans la deuxième moitié du XIVe siècle. L'abandon de ses précieux bronzes laisse entrevoir une panique générale. La végétation recouvrira le site, qui ne sera réoccupé qu'à la fin du XVIe siècle. Pourquoi un tel effondrement ? Gérard Chouin avance l'hypothèse de la peste venue d'Occident. *« Elle a circulé en Afrique du Nord, et des écrits en Éthiopie évoquent des saints pesteux*, souligne l'archéologue. *Il serait étonnant qu'Ifé n'ait pas été touchée. Mais les sols acides de la région ne nous ont pas encore permis de retrouver des squelettes dont l'ADN pourrait prouver la présence du pathogène. »* Le puzzle reste donc entier. Entretemps, la légende a pris le relais de l'histoire : pour le groupe ethnique Yoruba, Ifé est devenue le berceau du monde. Un mythe comme un lointain écho à son ancienne grandeur.

MARIE-AMÉLIE CARPIO

CRYPTOLOGIE

L'illisible manuscrit de Voynich

Nous sommes en 1912. L'antiquaire d'origine polonaise Wilfrid Voynich se rend dans une demeure de la campagne romaine, la villa Mondragone, où des jésuites se défont de livres anciens. Parmi ceux-ci, un étrange manuscrit. Divisé en six parties – botanique, astronomie, cosmologie, biologie, pharmacologie et recettes –, l'ouvrage de 234 pages est richement illustré : plantes réelles et fantaisistes, diagrammes stellaires, femmes nues baignant dans de grandes cuves de liquide vert, longs réseaux de tuyaux… Mais voilà, il est rédigé dans une langue inconnue. Depuis, le précieux volume, aujourd'hui conservé à l'université Yale, aux États-Unis, ne cesse de tourmenter historiens et cryptologues : nul ne sait qui en est l'auteur, ni quelle est sa véritable nature. Pour en percer les secrets, les chercheurs se sont attelés à en disséquer le contenu. En vain. Même le mathématicien britannique Alan Turing, qui a décrypté les codes secrets nazis, dut renoncer. Une seule certitude : grâce à la datation au carbone 14, les scientifiques apprendront en 2011 que les peaux qui ont servi à la fabrication du parchemin sont issues de veaux morts entre 1404 et 1438.

En 1950, le cryptologue américain William Friedman affirme que le texte a été volontairement chiffré. S'il échoue à le décrypter, il conclut toutefois que l'idiome utilisé a été inventé de toute pièce. Celui-ci partagerait des similitudes avec les langues indo-européennes : usage de doubles consonnes, fréquence des lettres… Par ailleurs, le texte semble soumis à des règles orthographiques. L'analyse de l'écriture, quant à elle, révèle un tracé fluide : le document aurait été rédigé d'une main assurée, et son auteur comprenait ce qu'il couchait sur le vélin.

MÊME LE MATHÉMATICIEN ALAN TURING, QUI AVAIT POURTANT DÉCRYPTÉ LES CODES SECRETS NAZIS, S'Y EST CASSÉ LES DENTS

Les théories se succéderont, plus ou moins sérieuses, jusqu'en 2019. Cette année-là, Gerard Cheshire, chercheur à l'université de Bristol, prétend qu'il s'agit d'un livre de remèdes rédigé en protoroman. Problème : cette langue – la dernière forme adoptée par le latin vulgaire avant sa différenciation en langues plus « modernes » – a disparu vers le VIe siècle et était exclusivement orale. L'hypothèse est donc réfutée par un grand nombre de spécialistes. Traité alchimique, ésotérique, médical… ou simple canular, aucune piste n'est encore à exclure.

WILLIAM ROWE-PIRRA

AFP PHOTO / CESAR MANSO / TO GO WITH AFP STORY BY MARIANNE BARRIAUX –

Retrouvé en 1912, le manuscrit est rédigé en une langue toujours indéchiffrée. Il contient notamment des illustrations de plantes étranges, laissant penser qu'il pourrait s'agir d'un traité médicinal.

MÉCANIQUE ANTIQUE

La machine d'Anticythère garde une part de mystère

Certaines découvertes forcent à réviser ce que l'on pensait savoir des civilisations du passé. C'est en 1900 que le pêcheur d'éponges Elias Stadiatis fait une telle trouvaille dans une baie de l'île d'Anticythère, en Grèce, lorsqu'il aperçoit une épave. Le navire est romain, sa cargaison grecque : une cohorte de statues, mais surtout un étrange puzzle tridimensionnel constitué d'au moins 82 pièces, dont des engrenages en bronze et un châssis en bois. Dans les années qui suivent, on tente de réassembler ce mécanisme corrodé par les siècles et la mer. En 1959, enfin, l'analyse de l'objet par radiographie aux rayons gamma réalisée par le physicien britannique Derek de Solla Price révèle un dispositif d'une complexité surprenante, composé de dizaines de roues dentées, tambours, aiguilles mobiles, axes et cadrans, solidaires et disposés en plusieurs plans. Le tout gravé d'inscriptions en grec et de symboles astronomiques. L'idée qu'un objet si complexe ait été conçu avant la Renaissance apparaît à l'époque incongrue. Le naufrage du navire est pourtant daté de l'an -87. Quant aux quelque deux mille lettres inscrites au dos de la machine, leur forme renvoie au IIe siècle avant notre ère. Xenophon Moussas, de l'université d'Athènes, a montré en 2006 que le texte fait office à la fois de mode d'emploi de l'objet et de traité d'astronomie. Les doutes se dissipent : la machine d'Anticythère est un calculateur astronomique ! Actionné par une manivelle, il décrit les mouvements du Soleil, de la Lune et des planètes visibles à l'œil nu, et permet de prévoir les éclipses.

C'est le plus vieux mécanisme à engrenages et calculateur connu au monde. En attendant que l'énigme de son auteur et de sa conception soit décryptée, il repose au Musée national d'archéologie d'Athènes, où il fait figure de trésor de technologie avant-gardiste, précédant de plusieurs centaines d'années le calendrier à engrenages byzantin du VIIe siècle… et de 1500 ans les premières horloges astronomiques occidentales.

W. R.-P.

AUTO-MOMIFICATION

Méditer jusqu'à ce que mort s'ensuive

La statue était… un cercueil. En 2014, aux Pays-Bas, l'examen au scanner d'un bouddha des XIe-XIIe siècles a révélé qu'il renfermait la dépouille d'un moine chinois qui se serait auto-momifié au prix d'une ascèse extrême. Entré dans l'état de *samâdhi* (méditation profonde), il serait devenu un bouddha vivant, ayant atteint l'Éveil ici-bas. C'est au début de notre ère que l'Asie centrale et la Chine auraient vu naître la pratique. Elle est bien documentée au Japon, qui abrite une vingtaine d'ascètes momifiés entre le XVIIe siècle et 1880, année où le rituel fut interdit. « *Ils étaient censés rester dans un état intermédiaire, outrepassant la mort jusqu'au "renouveau du monde" avec la venue de Maitreya, le Bouddha du futur* », souligne l'anthropologue Mary Picone, spécialiste du Japon à l'École des hautes études en sciences sociales. Si l'on en croit la tradition, les volontaires suivaient pendant des années un régime draconien de fruits, de racines et d'écorces, avant de ne plus absorber que de l'eau. Au comble du décharnement, ils s'enfermaient dans une cellule souterraine pour méditer jusqu'à se momifier. Une étude récente d'Andrea Castiglioni, de l'université de Nagoya, montre toutefois que les corps des ascètes étaient embaumés artificiellement par leurs disciples, qui les faisaient sécher dans des fumées d'encens et de bougies. Selon d'autres travaux, ces moines étaient peut-être aussi guidés par des motivations bien terrestres : certains sont morts lors de grandes famines, ce qui laisse penser qu'ils ont pu vouloir se sacrifier pour la communauté, qui aurait eu ainsi une bouche de moins à nourrir. « *Ces momies sont encore vénérées aujourd'hui* », note Mary Picone. Les habitants viennent leur adresser des prières pour obtenir divers bienfaits, en particulier la santé.

MARY PICONE

« LES MOMIES DE CES ASCÈTES SONT ENCORE VÉNÉRÉES AUJOURD'HUI »

Mary Picone, spécialiste du Japon à l'École des hautes études en sciences sociales

MARIE-AMÉLIE CARPIO

DRENTS MUSEUM, ASSEN ; UNIVERSITÄTSKLINIK/REISS-ENGLEHORN MUSEEN, MANNHEIM

À l'intérieur de la statue de ce moine, datant des XIe et XIIe siècles, se cache son corps momifié, révélé au scanner.

GETTY IMAGES

Araignée tracée d'une ligne continue sur 46 mètres. Les hypothèses sur la fonction des géoglyphes de Nazca abondent. Seule certitude : ils ne sont pas l'œuvre d'extraterrestres !

LIGNES DE NAZCA

Ces immenses figures invisibles... sauf du ciel

Tracées en grattant les couches superficielles du sol caillouteux pour faire ressortir les niveaux gypseux plus clairs situés au-dessous, les lignes de Nazca, ou géoglyphes, intriguent depuis leur découverte dans les années 1930. Et pour cause : réalisés il y a un millénaire, ces immenses dessins figuratifs ou géométriques qui parsèment le désert péruvien ne sont visibles que depuis le ciel. Colibri, singe, êtres humains… Le mystère de leur réalisation s'est éclairci au cours des dernières années : ils ont été tracés à l'aide de cordages, à partir de points fixes, par cette civilisation réputée pour ses tissages. Reste l'énigme de leur fonction. *« Il n'est pas possible qu'ils n'en aient qu'une seule »*, affirme Aïcha Bachir Bacha, responsable des fouilles du site d'Animas Altas. L'archéologue est à l'origine d'une nouvelle hypothèse. *« D'après mon travail de terrain, je pense que les géoglyphes sont des éléments connecteurs du territoire »*, indique-t-elle. Ils relieraient de façon symbolique, selon leur inclinaison et leur forme, deux sites d'habitation importants, un lieu naturel sacré avec un centre politique ou encore un lieu d'habitation avec des ressources, tels des minerais. Autre hypothèse récente : *« La pampa semble complètement vide, mais c'est un territoire de passage. Pour se l'approprier, on peut le marquer »*, détaille celle qui considère que l'hypothèse, *« heureusement dépassée »*, des extraterrestres est *« un mépris pour ces civilisations, grandes bâtisseuses »*. **MARINE CYGLER**

CRÂNES DÉFORMÉS

Une sacrée prise de tête

Plus de deux cents ans qu'ils sont des objets de fantasmes. Depuis le XIXe siècle, certains pensent même que les squelettes aux crânes allongés sont ceux d'extraterrestres… Pourtant, la déformation volontaire des crânes s'avère une pratique des plus communes. Si le continent américain concentre le plus grand nombre de cas, depuis les chasseurs-cueilleurs de Méso-Amérique au VIIIe millénaire avant notre ère aux Shamas des Andes centrales au XXe siècle, on la retrouve en Chine, en Océanie, en Afrique, en Asie centrale… *« Et jusqu'en Bourgogne, où des squelettes burgondes du Ve siècle sont ainsi déformés. Mais aussi dans la région toulousaine »,* note Jérôme Thomas, anthropologue à l'université Montpellier 3. Quelles que soient les latitudes, deux explications sont traditionnellement avancées à cette étrange pratique : la volonté d'une élite de se distinguer du reste de la communauté, et celle de se différencier d'autres groupes ethniques. Mais une troisième piste retient de plus en plus les chercheurs. *« On peut interpréter cette coutume d'un point de vue religieux*, souligne Jérôme Thomas. *En Amérique du Sud, en effet, on considérait qu'une force vitale, l'*animu, *circulait dans le corps et pouvait s'échapper par la tête, notamment au moment de la mort. Or, chez le nourrisson, la fontanelle n'est pas complètement fermée. Enserrer le crâne dans des bandages ou des planchettes de bois permettait d'interdire à l'âme de s'enfuir. »* Cette connotation religieuse n'avait pas échappé aux conquistadores. *« Au XVIIIe siècle, ils détruisaient les berceaux utilisés pour déformer les crânes des nourrissons, car ils les tenaient pour des objets idolâtres »*, précise le chercheur. En lien avec cette dimension spirituelle, des études associent les crânes allongés des Mayas à la forme du maïs, leur plante nourricière, et ceux des Collaguas, un peuple pré-inca de la vallée de la Colca, au Pérou, à un volcan qu'ils considéraient comme leur dieu tutélaire. M.-A. C.

WIKIPEDIA/MHNT

L'altération volontaire des crânes : rite spirituel, esthétique ou social ?

Page réalisée par Sara De Lacerda

Sur notre site

Des plantes bien dressées

Étrangement, la plupart des plantes terrestres, bien qu'elles descendent des algues tapissant les fonds sous-marins, ne poussent pas au ras du sol, mais prennent élégamment de la hauteur. Ce changement de direction s'est produit il y a 430 millions d'années et leur a permis d'augmenter leur durée de vie. Auparavant portées par l'eau, les premières plantes ayant conquis la terre ferme il y a 475 millions d'années ont en effet dû se rigidifier pour résister au vent. Elles ont alors perdu de leur souplesse et renforcé leur structure grâce à l'apparition de tissus lignifiés. Le principe du gravitropisme guide ensuite le comportement de la plante : afin de retrouver à tout prix sa position verticale, elle mesure en permanence son axe d'inclinaison grâce à des cellules présentes tout au long de sa tige, les statocytes, qui jouent un rôle de niveau à bulle interne. Dans le même temps, des protéines d'actine et de myosine présentes dans les tissus lignifiés vont former des câbles de tension qui lui indiquent sa courbure. Plus question de se laisser aller ! La plante met alors tout en œuvre pour se redresser, en étirant ses cellules du côté à hisser.
En s'élevant ainsi, les plantes ont non seulement augmenté leur résistance aux éléments, mais gagné un accès accru à la lumière ; cette prise de hauteur sert aussi aux angiospermes à mieux disperser leurs graines. Quel fascinant spectacle ! Les plantes ne nous prouvent-elles pas quotidiennement leur suprême habileté à grandir ?
https://sciav.fr/plantes

DOMINIQUE DELFINO / NATURAGENCY

Au cours de leur évolution, les plantes ont augmenté leur résistance en se rigidifiant.

Sous le zéro absolu… quelle chaleur !

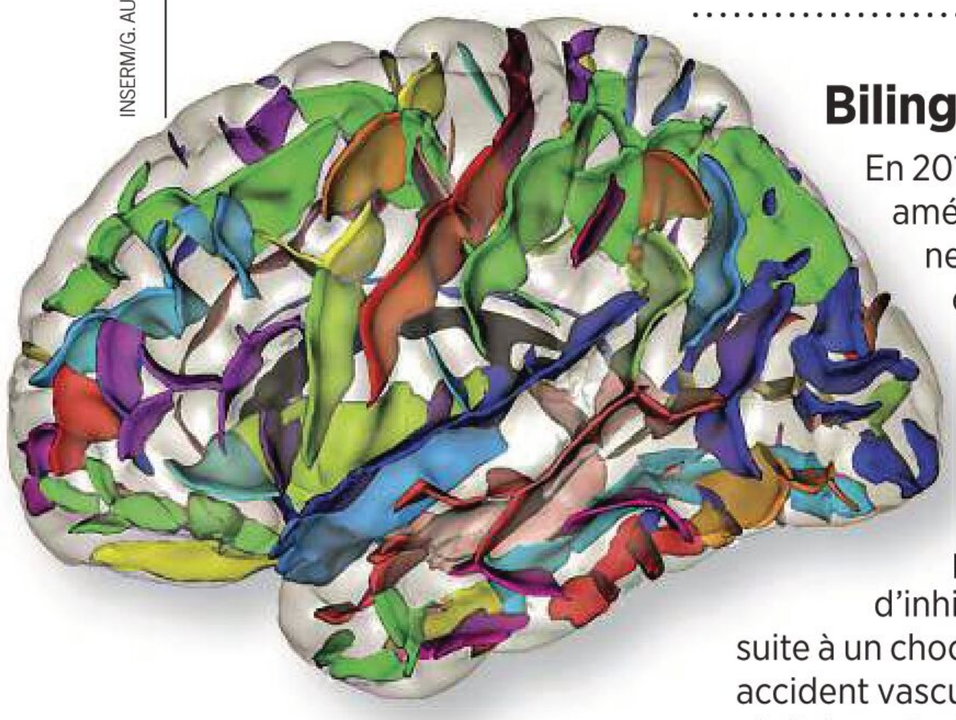
Est-il possible de dépasser les limites du froid – c'est-à-dire d'atteindre une température inférieure à 0° Kelvin (K), ou -273° Celsius (C), soit le zéro absolu ? Oui, et comme cette température ne peut être plus basse que le plus froid, elle est en réalité plus chaude ! C'est ce qu'ont démontré en 2013 des physiciens de l'université Louis-et-Maximilien de Munich (Allemagne). Pour cela, ils ont réussi à inverser, dans un gaz dont la température était proche du zéro absolu, le mode de répartition de l'énergie cinétique des particules qui le composaient (ce que l'on appelle la distribution de Boltzmann). La température d'un corps est en effet proportionnelle à l'énergie cinétique de ses particules, mais cette énergie est distribuée de manière hétérogène. Ainsi, lorsque la température d'un corps est positive, la majorité des particules s'agite à peine, tandis qu'un petit nombre seulement se situe à un niveau d'énergie élevé, ce qui crée de la chaleur. En inversant cette répartition de l'énergie, on obtient un corps dans lequel un grand nombre de particules se trouve à un niveau d'énergie maximal et une petite quantité seulement reste immobile. Par conséquent, bien que sa température soit négative – les états à haute énergie étant plus fréquents que ceux à basse énergie –, ce corps a paradoxalement gagné en chaleur, atteignant même la plus chaude des températures positives.
https://sciav.fr/ZéroAbsolu

ET AUSSI

Perçue de l'extérieur, notre voix nous semble trop aiguë
https://sciav.fr/SaVoix

Certaines espèces animales pratiquent des formes de rituels funéraires
https://sciav.fr/RituelsAnimaux

Illusions d'optique avec des objets en rotation : tout est question de fréquence
https://sciav.fr/illusions



INSERM/G. AUZIAS, S. BAILLET, O. COLLIOT

Langues maternelle et étrangères n'activent pas les mêmes zones du cerveau. Vue d'artiste.

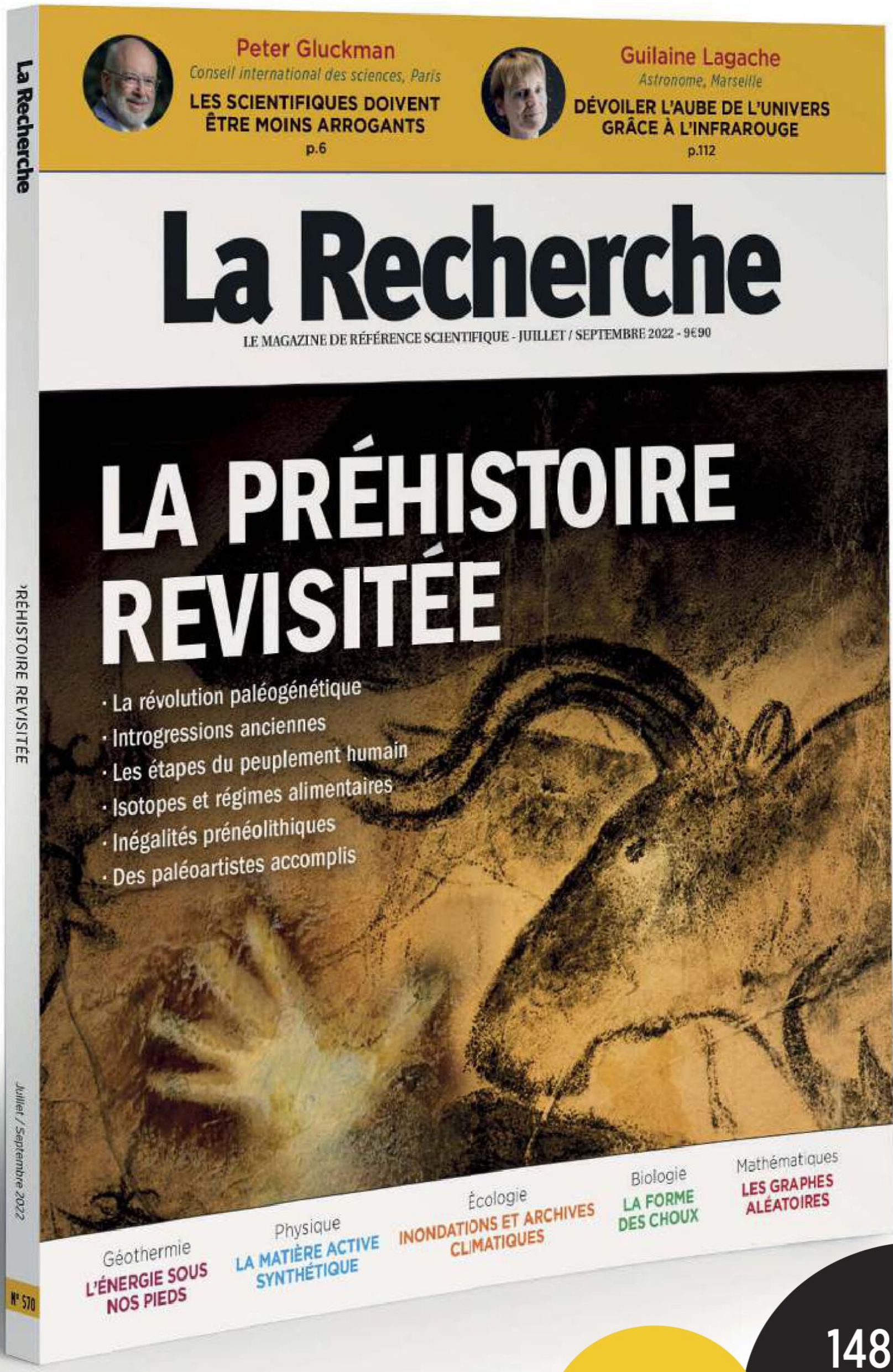
Bilinguisme de secours

En 2016, un jeune footballeur américain se réveille du coma et ne peut plus s'exprimer qu'en espagnol, langue dont il ne connaissait jusqu'alors que les bases, se révélant incapable d'articuler plus de quelques mots en anglais. Aussi surprenant qu'il puisse paraître, ce phénomène d'inhibition de la langue maternelle suite à un choc violent subi à la tête ou lors d'un accident vasculaire cérébral (AVC) fait en réalité partie du processus de recouvrement du langage. Connus depuis 1937, les cas relevant de ce que l'on appelle le « syndrome de l'accent étranger » sont très rares, mais les chercheurs ont pu comprendre qu'ils résultaient de l'étonnante plasticité du cerveau, car les langues s'acquièrent dans des régions différentes de cet organe. Ainsi, lorsque la zone utilisée pour parler sa langue maternelle est touchée par un traumatisme, si le patient possède des notions, même minimes, d'une autre langue, c'est la zone où s'est effectué ce deuxième apprentissage qui va s'activer pour répondre au besoin de communiquer. Au terme de sa convalescence, le jeune footballeur a retrouvé sa capacité initiale à parler anglais et perdu en parallèle son bilinguisme, qui n'était que transitoire.
https://sciav.fr/syndrome

32 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE



Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

RIVAGES
DU MONDE

Voguer. Échanger. Rêver

Croisière
Des côtes marocaines au Cap-Vert
Départ le 4 octobre 2022

Un itinéraire inédit et une date unique ! Découvrez des escales hors des sentiers battus, entre les mille contrastes du Maroc, pays des Berbères et les charmes généreux et volcaniques de l'archipel du Cap-Vert.

SA04

RÉSERVEZ VOTRE CROISIÈRE AU 01 83 96 85 03 OU SUR WWW.RIVAGESDUMONDE.FR

RCS Paris B 438 679 664 – 150 000 euros - Atout France IM 075 100 099 – AdobeStock.